

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

П. В. Кучернюк

ТЕХНОЛОГІЇ ОСТАННЬОЇ МИЛІ

Текст лекцій з дисципліни «Комп'ютерні мережі та засоби телекомунікацій»

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»,
спеціалізацією «Інформаційно-обчислювальні засоби радіоелектронних систем»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Рецензент: Цурін О.П., канд. техн. наук, доц.
Відповідальний редактор Корнєв В.П., канд. техн. наук, доц.

*Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 7 від 01.04.2019 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки
(протокол №02/2019 від 25.02.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Кучернюк Павло Валентинович, канд. техн. наук, доц.

ТЕХНОЛОГІЇ ОСТАННЬОЇ МИЛІ

Текст лекцій з дисципліни «Комп'ютерні мережі та засоби телекомунікацій»

Технології останньої милі: Текст лекцій з дисципліни «Комп'ютерні мережі та засоби телекомунікацій» [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», спеціалізації «Інформаційно-обчислювальні засоби радіоелектронних систем»/ П. В. Кучернюк; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,73 Мбайт). – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 124 с.

Навчальний посібник містить матеріали, які використовуються як безпосередньо у теоретичному курсі, так і матеріали для самостійної роботи студентів. У першому розділі посібника розглянуто типову структуру системи передачі даних та визначено типи пристроїв та інтерфейсів, які використовуються для побудови таких систем. Другий розділ присвячено розгляду особливостей технології DOCSIS, починаючи з версії 1.0 і закінчуючи останньою версією 3.1. У третьому розділі розглянуто особливості сімейства технологій цифрової абонентської лінії (DSL). Четвертий розділ посібника знайомить студентів із технологією пасивних оптичних мереж (PON). Розглянуто особливості і принцип роботи версій GPON і 10 G-EPON. Частина матеріалу розділу присвячена розгляду принципів побудови мереж PON. У п'ятому розділі детально розглянуто технологію бездротових мереж Wi-Fi, включаючи останні версії стандарту 802.11ac та 802.11ad.

© П. В. Кучернюк, 2019
© КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019

ЗМІСТ

	ВСТУП	5
1	СТРУКТУРА СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ	7
2	ТЕХНОЛОГІЯ DOCSIS	8
	2.1. Архітектурні особливості технології DOCSIS	11
	2.2. Особливості фізичного рівня	12
	2.3 Особливості методу TDMA	17
	2.4 Особливості методу S-CDMA	18
	2.5. Особливості підрівня MAC	20
	2.6. Підрівень захисту	21
	2.7. Кадри DOCSIS	22
	2.8. Підтримка QoS в технології DOCSIS	23
	2.9. Особливості версії DOCSIS 3.0	26
	2.10. Особливості версій DOCSIS 3.1 та Full Duplex DOCSIS 3.1	29
	2.11. Алгоритм роботи кабельних модемів	33
3	СІМЕЙСТВО ТЕХНОЛОГІЙ ЦИФРОВОЇ АБОНЕНТСЬКОЇ ЛІНІЇ	
	xDSL	39
	3.1. Особливості технології ADSL	41
	3.2. Особливості технології SHDSL	44
	3.3. Особливості технології VDSL	44
	3.4. Особливості технології IDSL	45
4	ТЕХНОЛОГІЇ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ (PON)	45
	4.1. Різновиди технології PON	48
	4.2. Особливості технології GPON	50
	4.3. Формат кадру GPON	51
	4.4. Особливості роботи протоколу MPCP	55
	4.5. Особливості технології 10 G-EPON (10 Gigabit Ethernet PON)	61
	4.6. Особливості побудови мереж PON	63
	4.6.1. Загальна термінологія	63

4.6.2. Розрахунок швидкості передачі даних по мережі PON	65
4.6.3. Вибір розгалужувачів (спліттерів)	65
4.6.4. Типові топології PON	68
4.6.5. Типи оптичних з'єднувачів	77
5 ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДРОТОВИХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ (WI-FI)	
СТАНДАРТІВ IEEE 802.11X	79
5.1. Режим роботи 802.11	81
5.2. Фізичний рівень IEEE 802.11	82
5.3. Канальний рівень IEEE 802.11	87
5.4. Кадри рівня MAC	90
5.5. Особливості стандарту IEEE 802.11a	96
5.6. Особливості стандарту IEEE 802.11b	97
5.7. Особливості стандарту IEEE 802.11g	98
5.8. Особливості стандарту IEEE 802.11n	99
5.9. Особливості стандарту IEEE 802.11ac	106
5.10. Особливості стандарту IEEE 802.11ad	109
5.11. Інші специфікації сімейства IEEE 802.11x	112
5.12. Безпека в мережах IEEE 802.11x	114
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	117
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	119

ВСТУП

Під останньою милею розуміють відрізок мережі від вузла користувача або граничного вузла локальної мережі до першого активного вузла (точки присутності - Point of Presence, POP) постачальника телекомунікаційних послуг.

Технології даного класу використовуються для вирішення наступних завдань:

- підключення користувачів або локальних мереж підприємств до вузлів операторів/провайдерів телекомунікацій для надання мультисервісних послуг (доступу до Інтернет, кабельного (CATV) та IP (IPTV) телебачення, відео на вимогу (VoD), IP телефонії (VoIP) і т. і.);
- підключення віддалених користувачів або філій до корпоративної мережі підприємства через проміжні мережі передачі даних;
- побудова корпоративних територіально – розподілених мереж.

Можна виділити наступні типи технології даного класу.

➤ Модемний зв'язок:

а) модеми на комутовані або виділені телефонні лінії (швидкість передачі до 64 Кб/с);

б) модеми на фізичні лінії (Short range modem) (відстань до 18 км, швидкість передачі до 738 Кб/с;

в) модеми для підключення до мереж кабельного телебачення (технологія DOCSIS);

г) xDSL – модеми (модеми, що використовують технології цифрової абонентської лінії - DSL).

➤ Пасивні оптичні мережі (PON).

➤ Бездротові технології (Wi-Fi, Wi-MAX, супутникові, мікрохвильові технології).

Перші два типи модемних технологій є морально і фізично застарілими і в наш час вже не використовуються. З їх особливостями можна ознайомитись,

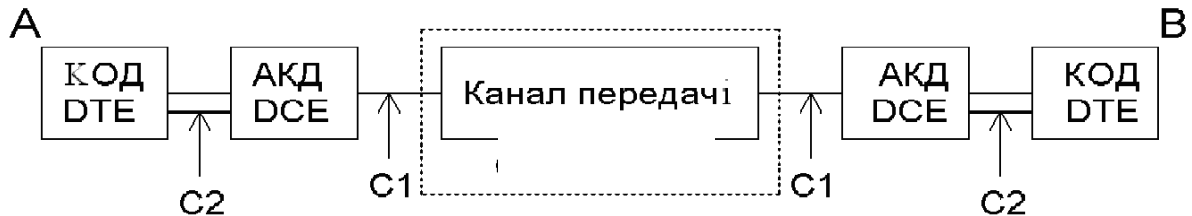
наприклад, в [О:1]. Найбільш поширеними технологіями «останньої милі» є технології DOCSIS, xDSL та PON. Серед бездротових технологій для побудови загальних мереж доступу найчастіше використовується технологія Wi-Fi.

Навчальний посібник «Технології останньої милі: Текст лекцій з дисципліни «Комп'ютерні мережі та засоби телекомунікацій» містить матеріали, які використовуються як безпосередньо у теоретичному курсі, так і матеріали для самостійної роботи студентів та виконання курсового проекту. Ці матеріали поділено на п'ять розділів. У першому розділі посібника розглянуто типову структуру системи передачі даних та визначено типи пристрої та інтерфейсів, які використовуються для побудови таких систем. Другий розділ присвячено розгляду особливостей технології DOCSIS, починаючи з версії 1.0 і закінчуючи останньою версією 3.1. У третьому розділі розглянуто особливості сімейства технологій цифрової абонентської лінії (DSL). Четвертий розділ посібника знайомить студентів із технологією пасивних оптичних мереж (PON). Розглянуто особливості і принцип роботи версій GE-PON і 10 G-EPON. Частина матеріалу розділу присвячена розгляду принципів побудови мереж PON. У п'ятому розділі детально розглянуто технологію бездротових мереж Wi-Fi, включаючи останні версії стандарту 802.11ac та 802.11ad. З особливостями інших бездротових технологій, які використовуються в системах передачі даних (Wi-MAX, супутникові, мікрохвильові технології) можна ознайомитись, наприклад, в [О:2].

Навчальний посібник призначений для студентів радіоелектронних та телекомунікаційних спеціальностей, інженерно-технічних спеціалістів та аспірантів.

1. СТРУКТУРА СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Система передачі даних між вузлами А та В має наступний вигляд (рис. 1.1) [О:3].



DTE – кінцеве обладнання даних; DCE – обладнання каналу даних; C1,2 – інтерфейс (стик);
ЛОМ – локальна обчислювальна мережа

Рисунок 1.1 - Структура системи передачі даних

DTE – кінцеве обладнання даних – є джерелом або одержувачем інформації. DTE приймає або передає дані через канал передачі за допомогою апаратури каналу даних (АКД або DCE). Основна функція DCE – забезпечення можливості передачі даних між двома або більше DTE-пристроями по каналу певного типу.

Інтерфейс між DCE й DTE пристроями зветься стиком C2. Інтерфейс між DCE і каналом передачі називається стиком C1. У випадку локальної мережі як стик C1 виступає з'єднувач RJ-45 для підключення мережного кабелю, DCE-пристрій – мережний адаптер, стик C2 – шина PCI, DTE-пристрій – персональний комп'ютер. При підключенні по модемних технологіях: DCE-пристрій – модем, стик C1 – з'єднувач RJ-11(12), стик C2 – порт для підключення модему (COM, USB).

У випадку підключення до цифрових каналів передачі, наприклад ISDN або магістралі E1, DCE-пристрій називається пристроєм обслуговування даних/каналу (DSU/CSU).

Пристрій обслуговування даних (DSU) виконує фізичне кодування сигналів, що надійшли від DTE, формує кадри (наприклад, E1-кадр), виконує функції синхронізації.

Пристрій обслуговування каналу (CSU) відповідає за підтримку необхідних умов передачі електричних сигналів через канал (процедури тестування каналу, відновлення форми електричного сигналу, подання електричного сигналу у всій смузі частотного каналу). Зазвичай, DSU/CSU реалізується у вигляді одного апаратного пристрою.

2. ТЕХНОЛОГІЯ DOCSIS

Data Over Cable Service Interface Specifications (DOCSIS) - специфікація інтерфейсу служби передачі даних по кабелю - визначає рівень контролю доступу до середовища (MAC) і фізичний рівень для забезпечення високошвидкісної передачі даних через гібридну оптично-коаксиальну (Hybrid Fiber Coax - HFC) кабельну мережу, яка використовується у системах кабельного телебачення [О: 4, Д: 1, 2].

У 1998 р на сесії робочої групи ITU в Женеві був схвалений основоположний стандарт J.112, який визначає методи передачі даних по мережах кабельного телебачення. Базуючись на основі стандартів ITU J.112 і J.83, консорціумом CableLabs у співпраці з широким колом виробників обладнання був розроблений єдиний міжнародний стандарт, відомий під назвою Data Over Cable Service Interface Specification (DOCSIS). Цей стандарт передбачав передачу даних абоненту по мережі кабельного телебачення з максимальною швидкістю до 42 Мб/с (при ширині смуги пропускання 6 МГц і використанні багаторівневої амплітудної модуляції 256 QAM) і отримання даних від абонента зі швидкістю до 10,24 Мб/с. Прийняті ITU документи

містять також три додатки, що враховують специфічні особливості американського, європейського і японського ринків послуг CATV і використовувані в цих регіонах стандарти (NTSC, PAL, SECAM).

На сьогоднішній день існує декілька версій специфікації DOCSIS [Д: 3]:

- DOCSIS 1.0,
- DOCSIS 1.1,
- DOCSIS 2.0,
- DOCSIS 3.0,
- DOCSIS 3.1,
- EuroDOCSIS.

EuroDOCSIS регламентує прийнятий для Європи розподіл частот прямого і зворотного каналу, обумовлює роботу зі смугою 8 МГц. Версії відрізняються, перш за все, схемами модуляції сигналів, що використовуються, та підтримкою агрегування декількох фізичних каналів в один більш високошвидкісний (версія DOCSIS 3.0 і вище).

На рис. 2.1 наведено типову структуру мережі, яка використовує технологію DOCSIS.

Головне обладнання оператора, яке носить назву - система термінації кабельних модемів (Cable Modem Termination System - CMTS), з'єднана через гібридну оптично-коаксиальну (HFC) кабельну мережу з кабельними модемами (cable modems - CMs), кількість яких може досягати ста і, навіть, тисячі одиниць. З урахуванням напрямку передачі даних канали поділяються на низхідний або прямий канал передачі даних (downstream – Down) від оператора до користувача та висхідний або зворотній канал (upstream – UP) – від користувача до оператора. Для організації цих каналів з використанням частотного розподілення виділяються певні частотні діапазони. Низхідний канал має ширину полоси пропускання 6 МГц (8 МГц у Європі) і спільно використовується (розділяється) усіма абонентами за схемою один-до-багатьох (CMTS передає по цьому каналу кадри, призначені усім кінцевим абонентам. Кожний модем має власну MAC-адресу і може виділяти з загального потоку

кадри, які призначені саме йому). В результаті доступна кінцевому користувачеві пропускна здатність залежить від кількості кінцевим вузлів і може змінюватись в широких межах.

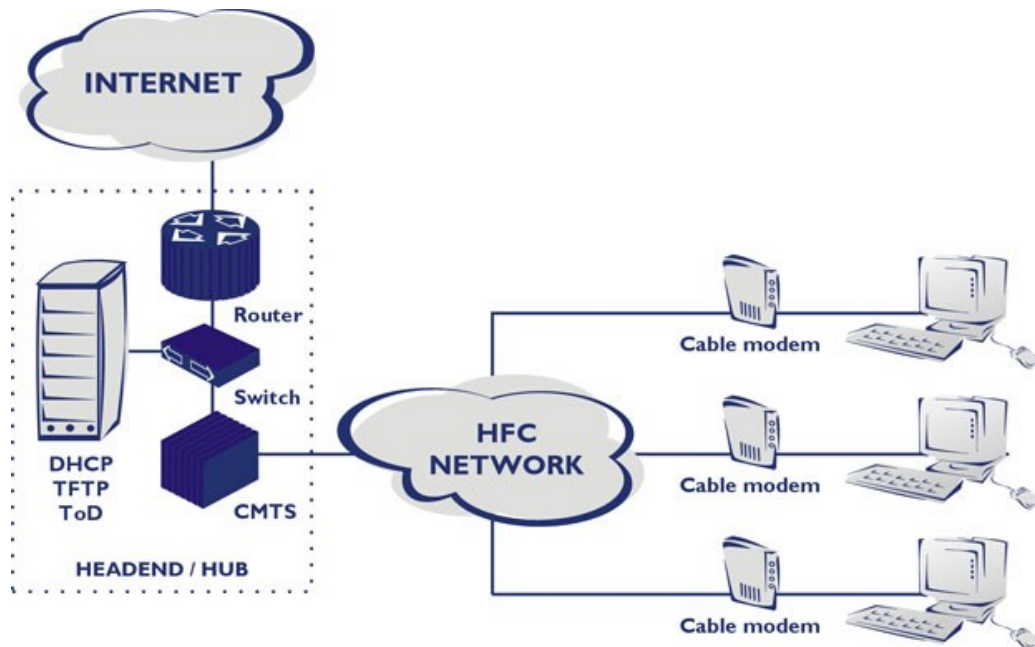


Рисунок 2.1 – Структура DOCSIS мережі

Висхідний або зворотній канал (upstream – UP) може мати ширину полоси пропускання від 0,2 до 6,4 МГц і для управління доступом до каналу кінцевих користувачів використовується, в залежності від версії технології, або метод TDMA (множинний доступ з часовим розподіленням), або метод S-CDMA (множинний доступ з кодовим розподіленням - підтримується у версіях DOCSIS 2.0 і вище). Особливості цих методів буде розглянуто нижче. У таблиці 1.1 наведено швидкості передачі різних версій протоколу DOCSIS. Особливості версії DOCSIS 3.1 буде розглянуто нижче окремо.

2.1. Архітектурні особливості технології DOCSIS

Як і технології стандартів IEEE 802 стандарт на технологію DOCSIS описує два нижні рівні моделі OSI, спираючись на стандартні протоколи верхніх рівнів та протокол LLC канального рівня (рис. 2.2) [Д: 3].

Канальний рівень в архітектурі DOCSIS складається з наступних підрівнів:

- підрівень управління логічним з'єднанням (Logical Link Control – LLC - стандарт IEEE 802.2, пізніша модифікація IEEE 802.14);
- підрівень захисту каналу, що забезпечує загальну безпеку, авторизацію і автентифікацію;
- підрівень управління доступом до середовища передачі (Media Access Control - MAC) для підтримки кадрів даних протоколу (Protocol Data Units - PDU) змінної довжини, який реалізує наступні функції:
 - управління конфліктами і можливостями передачі;
 - виділення міні-слотів для управління висхідним потоком;
 - ефективне використання смуги пропускання за рахунок пакетів змінної довжини;
 - розширення для підтримки в майбутньому асинхронної передачі (Asynchronous Transfer Mode - ATM) та інших типів PDU;
 - підтримка багаторівневих служб і різних швидкостей передачі.

Таблиця 1.1 - Швидкості передачі різних версій протоколу DOCSIS

Версія	DOCSIS		EuroDOCSIS	
	Прямий канал (Down)	Зворотній канал (Up)	Прямий канал (Down)	Зворотній канал (Up)
1.x	42,88 Мб/с	10,24 Мб/с	55,62 Мб/с	10,24 Мб/с
2	42,88 Мб/с	30,72 Мб/с	55,62 Мб/с	30,72 Мб/с
3.0 4channel	171,52 Мб/с	122,88 Мб/с	222,48 Мб/с	122,88 Мб/с
3.0 8channel	343,04 Мб/с	122,88 Мб/с	444,96 Мб/с	122,88 Мб/с

Фізичний (PHY) рівень складається з наступних підрівнів:

- підрівень низхідної конвергенції, погоджений з MPEG-2 (Rec. H.222.0);
- фізичний підрівень, що залежить від середовища передачі (Physical Media Dependent - PMD), який, у свою чергу, реалізовує такі функції:

для низхідного потоку

- 64- або 256-рівневу квадратурно-амплітудну модуляцію (QAM),
- функцію упереджуючих корекцій помилок (Forward Error Correction - FEC) за алгоритмами Ріда-Соломона (Reed-Solomon) і трелліс (Trellis) кодування,
- функцію побудови черг змінної довжини;

для висхідного потоку

- квадратурно-фазову модуляцію (Quadrature Phase-Shift Keying - QPSK) або 16-рівневу QAM модуляцію;
- підтримка декількох символічних швидкостей;
- швидка перебудова частоти;
- підтримка форматів PDU для фреймів фіксованої і змінної довжини;
- множинний доступ з часовим розподіленням (Time-Division Multiple Access - TDMA) або синхронний множинний доступ з кодовим розподіленням (S-CDMA - Synchronous-Code Division Multiple Access),
- програмовані FEC Reed-Solomon і префікси;
- підтримка можливих майбутніх технологій фізичного рівня.

Крім того, ця специфікація визначає спосіб, яким кабельний модем може самостійно визначати частоти, бітові швидкості, формат модуляції, корекцію помилок і рівні напруги для висхідних і низхідних потоків.

2.2. Особливості фізичного рівня

Розподіл частот в DOCSIS показано на рис. 2.3. Підрівень PMD низхідного каналу використовує полосу шириною 6 МГц (8 МГц для застосування в Європі) в смузі частот від 91 до 857 МГц. Застосовуваний тип модуляції може бути або QAM-64, або QAM-256 (в залежності від версії).

Символьна швидкість в прямому каналі складає 5.057 і 5.36 Мбод для QAM-64 і QAM-256 відповідно (табл. 2.2). Максимально можливі швидкості передачі бітів при цьому мають значення 30.342 і 42.88 Мб/с. Зворотній канал розташований у смузі частот від 5 до 42 МГц (5-65 МГц для застосування в Європі). Цей діапазон може розділятися на канали шириною 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 та 3.2 МГц (у DOCSIS 3.0 – 6,4 МГц). У зворотному каналі може використовуватися або QPSK, або QAM-16 модуляція (DOCSIS 1.x; стандарт DOCSIS 2.0 додає модуляції QAM-32 та QAM-64). Залежно від смуги використаних частот символьна швидкість у зворотному каналі складе 160, 320, 640, 1280 і 2560 Кбод. У свою чергу при модуляції QPSK максимально можливі швидкості передачі даних можуть становити від 0.32 до 5.12 Мб/с, а при QAM-16 - від 0.64 до 10.24 Мб/с (табл. 2.3).

Рівні моделі OSI	Рівні технології DOCSIS	
Верхні рівні (прикладний-сеансовий)	Додатки та протоколи верхніх рівнів	Керуючі повідомлення DOCSIS
Транспортний рівень	TCP або UDP	
Мережний рівень	IP	
Канальний рівень	Підрівень LLC IEEE 802.2	
	Підрівень захисту	
	Підрівень DOCSIS MAC	
Фізичний рівень	Висхідний потік	Низхідний потік Підрівень конвергенції (MPEG-2)
	Підрівень PMD Цифрова модуляція (QAM-16 або QFSK), FEC. Частотна смуга 5-65 МГц. Ширина полоси 0,2 - 6,4 МГц	Підрівень PMD Цифрова модуляція (QAM- 64 або QAM-256), FEC. Частотна смуга 91-857 МГц. Ширина полоси 8 МГц
	Гібридна оптично-коаксиальна (HFC) кабельна система	

Рисунок 2.2 - Рівні протоколів DOCSIS та моделі OSI

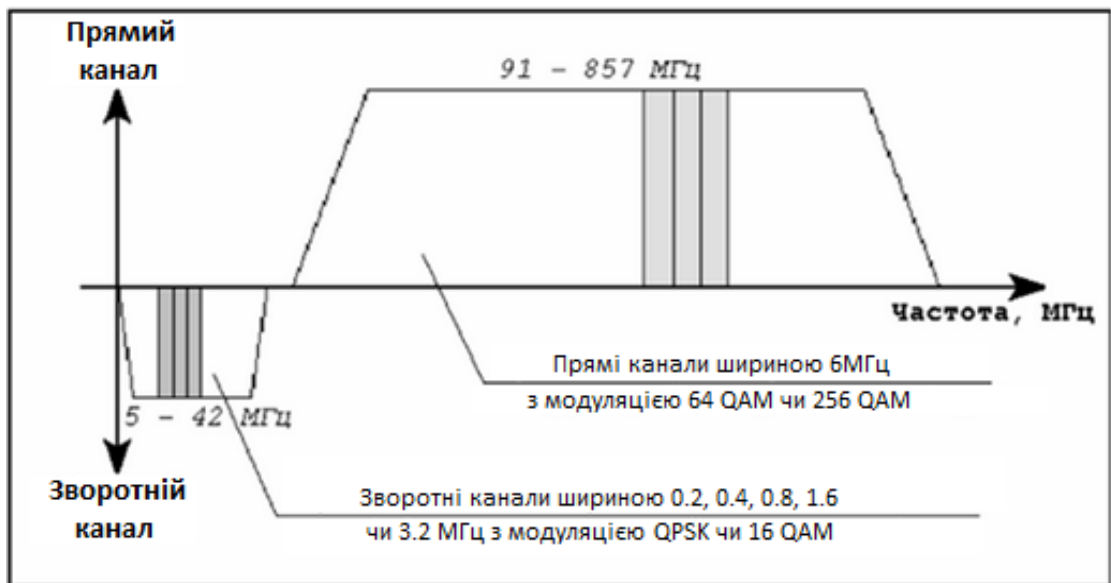


Рисунок 2.3 - Розподіл частот в DOCSIS 2.0

Таблиця 2.2 – Швидкісні характеристики прямого каналу DOCSIS 1.x

Тип модуляції	Символьна швидкість, Мсимв/с або Мбод	Швидкість передачі, Мб/с	Ефективна швидкість, Мб/с
QAM-64	5,06	30,34	27
QAM-256	5,36	42,88	39

Таблиця 3 – Швидкісні характеристики зворотного каналу DOCSIS 1.x

Символьна швидкість, Кбод	Ширина полоси каналу, МГц	Швидкість передачі для QPSK, Кб/с	Швидкість передачі для QAM-16, Кб/с
160	0,2	290	580
320	0,4	580	1160
640	0,8	1150	2300
1280	1,6	2300	4600
2560	3,2	4600	9200

Символьна швидкість дорівнює кількості змін параметрів несучої за одиницю часу і залежить від методу модуляції. Швидкість передачі цифрового потоку – це загальна швидкість бітового потоку з урахування додаткових бітів завадозахищеного кодування, бітів заголовку, преамбули та захисного інтервалу. Ефективна швидкість – це швидкість передачі даних прикладного процесу без урахування службової інформації.

Реальна швидкість передачі для кінцевого абонента буде ще менше і залежить від кількості одночасно працюючих кабельних модемів, які спільно використовують канали передачі.

Підрівень PMD висхідного потоку може використовувати режим FDMA/TDMA (позначається як TDMA режим) або FDMA/TDMA/S-CDMA режим (позначається як S-CDMA режим) [О: 4, Д: 3]. Конкретний метод управління доступом к каналу реалізовано на підрівні DOCSIS MAC висхідного потоку. Використання множинного доступу з частотним розподілом дозволяє реалізувати декілька частотних каналів в частотному діапазоні висхідного каналу. Вибір частотного каналу для передачі кабельним модемів виконується на етапі його конфігурування з боку CMTS. За допомогою методу TDMA для кабельних модемів на підрівні DOCSIS MAC виділяються часові слоти, які носять назву міні-слотів. Міні-слот – це часовий проміжок необхідний для передачі фіксованої кількості байт (DOCSIS 2.0 – 16 байт). Кожний кабельний модем має право передавати дані в висхідний канал тільки у визначений йому часовий проміжок. В режимі TDMA тривалість міні-слоту визначаються у кількості T базових часових відліків (Timebase Tick), які дорівнюють 6.25 мкс (значення визначається мінімальною символьною швидкістю 160 Кбод). Тривалість міні-слоту дорівнює $T \times 6.25$ мкс, де $T = 2^m$. Для DOCSIS 1.x m може приймати значення від 1 до 7, для DOCSIS 2.0 або 3.0 – від 0 до 7. Якщо $T=1$ ($m=0$), канал розглядається тільки як канал DOCSIS 2.0/3.0.

У режимі S-CDMA множина кабельних модемів може одночасно передавати дані в один канал протягом одного міні-слоту. Тривалість міні-слоту не пов'язана з базовими часовими відліками, а визначається

символьною швидкістю, кількістю розширюючих кодів і кількістю інтервалів розширення, які задаються при конфігуруванні висхідного каналу. Тривалість міні-слоту не пов'язана з розміром кадру MAC-рівня, в результаті чого, передача одного кадру може потребувати декількох послідовних міні-слотів.

Підрівень конвергенції низхідного потоку забезпечує можливість реалізації прийому відео та комп'ютерних даних у кабельних модемах на апаратному рівні. Підрівень конвергенції отримує кадри з підрівня DOCSIS MAC та перетворює їх у безперервний бітовий потік 188 байтових MPEG пакетів. Цей потік передається на підрівень PMD для подальшої обробки. Формат MPEG пакету наведено на рис. 2.4.

MPEG header	Pointer field (1 байт)	DOCSIS payload (183 або 184 байти)
-------------	------------------------	------------------------------------

Рисунок 2.4 – Формат MPEG пакету

Призначення полів:

- MPEG header – має довжину 4 байти і включає такі поля: 8-бітове поле *sync_byte*, 1-бітовий індикатор – *payload_unit_start_indicator (PUSI)*, який вказує на наявність *pointer_field* у першому байті DOCSIS payload і 13-бітовий індикатор пакету – *packet_indicator*, який використовується для ідентифікації даних DOCSIS (зазвичай містить значення 0x1FFE);
- DOCSIS payload - містить кадр DOCSIS підрівня MAC. Може містити Pointer field (тоді довжина DOCSIS payload складатиме 183 байти).

Кадр DOCSIS може починатися у будь-якому місці MPEG пакету і займати декілька пакетів. Pointer field використовується для коректного виділення DOCSIS кадру з MPEG пакету. Pointer field знаходиться у 5-му байті MPEG пакету, якщо індикатор PUSI має значення «1». Значення у цьому полі вказує на кількість байт в полі DOCSIS payload, після яких розпочнеться DOCSIS кадр (декодер кабельного модему повинен відкинути ці байти).

2.3 Особливості методу TDMA

У DOCSIS 1.x використовується множинний доступ з часовим розподілом TDMA (Time Division Multiplexing Access) [О: 4, Д: 3]. Для кожного кабельного модему виділяються різні часові слоти і під час передачі від одного абонента інші модеми мовчать, що виключає інтерференцію між їх сигналами. При цьому може формуватися кілька таких зворотних каналів (фактично, використовується комбінований метод множинного доступу).

У DOCSIS 2.0 включений метод A-TDMA (Advanced-TDMA) - стандартний TDMA з деякими доповненнями, що дозволяють збільшити швидкість сигналу і підвищити його стійкість перед перешкодами [О: 4, Д: 3]. Специфікація A-TDMA передбачає можливість формування каналу шириною 6.4 МГц, що вдвічі більше допустимого значення у DOCSIS 1.x. У якості схем модуляції для зворотного каналу DOCSIS 1.x використовуються QPSK і QAM-16. У DOCSIS 2.0 додані схеми модуляції QAM-8, QAM-32 і QAM-64. Обов'язковою для використання є лише остання, а модуляції QAM-8 і QAM-32 включені в специфікацію для можливості вибору оптимального співвідношення між швидкістю передачі і якістю сигналу. Для збільшення завадостійкості використовується код Ріда-Соломона зі збільшеною в порівнянні з DOCSIS 1.x кількістю контрольних байт. В результаті, коригувальна здатність коду збільшена з 10 байтів на блок до 16 байтів на блок. Так само як і в DOCSIS 1.x, до коду Ріда-Соломона додано блочне перемежовування, що дозволяє відновлювати тривалі серії спотворених символів. В DOCSIS1.x глибина перемежовування фіксована, а в DOCSIS 2.0 задається програмно.

Для боротьби з мікровідбиваннями та перешкодами широкосмугового поширення і компенсації групової затримки сигналу всі версії DOCSIS передбачають використання адаптивних еквалайзерів, що компенсують частотні і часові спотворення імпульсів в каналі зв'язку. В DOCSIS 2.0 – кількість каналів еквалайзера збільшено до 24, в порівнянні з 8 в DOCSIS 1.x. Додатково до цього скорочена за часом процедура адаптації (навчання)

еквалайзера. Це дозволяє підвищити стійкість сигналу і розширити частотний діапазон зворотного каналу.

2.4 Особливості методу S-CDMA

S-CDMA – це система множинного доступу з кодовим розподіленням [О: 4, Д: 3].

Такі системи дозволяють передавати повідомлення від декількох джерел в загальній частотній смузі і одному часовому проміжку. Для того щоб їх можна було виділити на приймальній стороні, кожне повідомлення множиться на власну псевдовипадкову послідовність, яка є ортогональною іншим послідовностям. Швидкість зміни символів псевдовипадкових послідовностей у багато разів більше зміни переданих інформаційних символів, що робить послідовності пізнаваними на приймальній стороні. За рахунок швидкості і псевдовипадкової послідовності що накладається, результуючий сигнал має широкий шумоподібний спектр з низькою питомою потужністю. Такі сигнали характеризуються високою завадостійкістю, так як при ураженні сигналу вузькосмуговою перешкодою він може бути відновлений з неспотвореної частини. Ортогональність, тобто повне некорелювання різних псевдовипадкових послідовностей призводить до того, що вищі гармоніки сигналів, перемножені на різні послідовності, не збігаються, і вони можуть співіснувати в одній частотній смузі. Виділення сигналу на приймальній стороні відбувається за рахунок подачі тієї ж псевдовипадкової послідовності в резонатор, який підсилює потрібний сигнал і виділяє його з сумарного шумоподібного сигналу. Потім з нього виключається накладена псевдовипадкова послідовність і відновлюються вихідні дані.

S-CDMA, який використовується у DOCSIS 2.0, є комбінацією методів CDM (мультиплексування з кодовим розподіленням) та CDMA. Дані, що надходять, упаковуються в міні-слоти, які представляють собою комірки з даними від одного модему. Міні-слот вміщує символи від одного СМ. Міні-

слоти характеризуються двома параметрами - кодом (псевдовипадковою послідовністю що накладається) і тривалістю. Кожен символ що кодується перемножується з псевдовипадковою послідовністю з 128 символів (chips). Кількість використовуваних кодів розширення може бути зменшено з метою збільшення потужності, що припадає на один код, і поліпшення параметрів S-CDMA. Мінімальна кількість кодів 64.

Для збереження ширини результуючого сигналу тривалість інформаційних імпульсів в порівнянні з режимом A-TDMA розтягується в 128 разів. Стандарт допускає зменшення числа кодуючих символів псевдовипадкової послідовності до 64. Сумарна тривалість міні-слотів становить один кадр (frame) S-CDMA, який за часом може покривати не більше 32 символних інтервалів. Кількість псевдовипадкових кодів, що використовується при формуванні одного міні-слота, програмується і може коливатися від 2 до 128. Відповідно, кількість модемів, які ведуть передачу в одному кадрі, буде коливатися від 64 до 1. Якщо передачу веде тільки один модем, S-CDMA вироджується в чистий CDM.

Специфікація S-CDMA також включає описані вище можливості розширення пропускної здатності сигналу - подвоєну ширину смуги, додаткові типи модуляції, посилене захисне кодування. Додатково до посиленого коду Ріда Соломона, специфікація S-CDMA в якості опції передбачає можливість використання решітчастого (треллістного) коду. Модульований сигнал з накладеним решітчастим кодом позначається як TCM. Його використання вдвічі знижує кількість інформації, що передається кожним QAM символом. Тому специфікація включає можливість використання TCM-128, яка дозволяє передати таку ж кількість інформаційних біт, як і QAM-64 без решітчастого кодування.

A-TDMA і S-CDMA можуть співіснувати в одній системі, використовуючись по чергово.

2.5. Особливості підрівня MAC

Протокол DOCSIS підрівня MAC керує передачею кадрів від кабельних модемів через висхідний канал, забезпечуючи QoS та інші особливості [О: 4, Д: 1, 2].

Як було зазначено вище, системи передачі з використанням технології DOCSIS мають несиметричну архітектуру: одна головна станція CMTS може обслуговувати сотні і навіть тисячі кабельних модемів. Усі кабельні модеми приймають кадри від головної станції по виділеному для них частотному каналу. Таким чином, при передачі в низхідному потоці будь-яка конкуренція за канал відсутня (передачу веде тільки головна станція). Основною проблемою тут є захист інформації (усі кабельні модеми, які використовують один низхідний частотний канал можуть отримувати кадри, призначені для інших модемів).

При передачі даних від модемів в висхідний канал вони вимушені конкурувати один з одним за доступ до каналу. Ця конкуренція може виникнути, коли модемі надсилають запит до головної станції на виділення їм міні-слотів для передачі кадрів (конкуренція може виникнути також, коли модеми спробують передати коротке повідомлення, для якого вони не запрошували міні-слоти). Як вже було зазначено вище, для забезпечення множинного доступу до каналу використовується метод TDMA, згідно з яким головна станція виділяє часові інтервали (міні-слоти). За своїм призначенням ці часові інтервали поділяються на три види:

- зарезервовані (**reserved**),
- колізійні (**contention**),
- ранжируючі (**ranging**).

Будь-який кабельний модем може передавати дані або запити у колізійні інтервали. Якщо декілька модемів спробують провести передачу протягом одного колізійного інтервалу, виникне колізія, яку розпізнає головна станція та повідомить про це модеми. Модеми повинні припинити передачу, згенерувати випадкове значення часу очікування, після завершення якого зробити нову

спробу провести передачу. Зазвичай, колізійні інтервали використовуються для передачі коротких запитів на виділення зарезервованих інтервалів для передачі даних (міні-слотів). При отриманні таких запитів головна станція виділяє міні-слоти (зарезервовані інтервали) у відповідності з протоколом для передачі кадрів від модему по висхідному каналу.

Ранжируючі слоти призначені для синхронізації і узгодження рівнів сигналів. Перша задача пов'язана з тим, що протяжність кабельних сегментів може значно відрізнятися, в результаті чого різниця у затримках розповсюдження сигналів від різних модемів може досягати декількох мілісекунд. В результаті, сигнал від одного модему може не вкластися в виділений для нього часовий інтервал і накладатися на сигнал іншого модему. Для компенсації різниць затримок розповсюдження сигналів використовуються ранжируючі слоти. Зазвичай, це три послідовні часові інтервали. За вимогою головної станції кабельний модем передає сигнал у середньому (2-му) інтервалі (два крайні інтервали створюють «захисний» інтервал для запобігання можливих колізій). CMTS визначає затримку і повідомляє модему, на яку величину він повинен скорегувати власний таймер в ту чи іншу сторону.

Друге призначення ранжируючих слотів – це узгодження рівнів потужностей сигналів від різних модемів, щоби усі сигнали, які надходять на головну станцію мали однаковий рівень. CMTS не зможе виявити колізію сигналів, рівень потужності яких сильно відрізняється.

2.6. Підрівень захисту

В рамках DOCSIS 1.0 система безпеки регламентується специфікацією BPI (Baseline Privacy Interface specification) [О: 4, Д: 1, 2, 3]. Відповідно до неї інформація, що передається по мережі, може шифруватися за допомогою алгоритму DES з використанням 56-бітних ключів, а також регламентується обмін ключами з використанням 768-розрядного шифрування RSA.

BPI дозволяє захистити інформацію від розшифрування при перехопленні, але не передбачає механізмів боротьби з несанкціонованим

використанням адрес. У DOCSIS 1.1 ця специфікація була вдосконалена і отримала назву BPI +. У ній передбачені додаткові механізми ідентифікації кабельних модемів з використанням цифрових сертифікатів. Цей сертифікат вводиться виробником кабельного модему і постійно в ньому зберігається. Кабельний модем повинен надати сертифікат, який засвідчує, що MAC- адреса і відкритий ключ RSA дійсно належать йому. Контроль сертифікату захищає від несанкціонованого використання MAC адреси модему. Іншим важливим додаванням в специфікації BPI + став механізм шифрування багатоадресних повідомлень. BPI + передбачає контроль доступу до багатоадресних повідомлень за рахунок пересилання схем розшифрування тим кабельним модемів, яким повідомлення адресовано. Слід відзначити що, забезпечуючи конфіденційність передачі і ідентифікацію передплатників, BPI і BPI + не в змозі захистити, наприклад, від атак типу «відмова в обслуговуванні», коли який-небудь зловмисник «забиває» весь зворотній канал.

2.7. Кадри DOCSIS

Кадр DOCSIS складається з заголовку (MAC header) і протокольного блоку даних (PDU) [О: 4, Д: 1, 2, 3]. За основний формат PDU прийняті кадри Ethernet змінної довжини.

Кадр DOCSIS, який передається, (рис. 2.5) розбивається на так звані кодові слова, що складаються з інформаційних даних, захищених кодом Ріда-Соломона, до яких додається преамбула і захисний інтервал. Параметри кадрів призначаються CMTS. При цьому довжина інформаційних даних може бути 16-253 байта, кількість байтів, які виправляються кодом Ріда-Соломона може варіюватися від 1 до 10 (додаткове завадостійке кодування може не застосовуватися). Довжина преамбули становить 0-1024 біт, величина захисного інтервалу може бути 5-255 символів. Слід зазначити, що довжина одного пакета не може бути більше 255 міні-слотів. Таким чином, DOCSIS характеризується значною гнучкістю при визначенні можливих "сценаріїв" роботи мережі, залежно від характеру даних що передаються і структури

кабельної мережі. Оптимізація мережі можлива при призначенні різних значень таких величин: довжини інформаційних даних в кодовому слові, числа байтів, які виправляються кодом Ріда-Соломона і розміру міні-слотів.



Рисунок 2.5 - Структура кадрів DOCSIS що передаються

2.8. Підтримка QoS в технології DOCSIS

У DOCSIS 1.0 використовується статична модель QoS, заснована на класах обслуговування (Class of service - CoS) [О: 4, Д: 1, 2, 3]. Клас обслуговування заноситься в конфігураційний файл модему при його ініціалізації. Він визначає характеристики обслуговування потоків даних від модему до головної станції і в зворотному напрямі. Клас обслуговування встановлює мінімальну і максимальну швидкість в зворотному каналі, максимальну швидкість в прямому каналі, максимально допустимий одноразовий обсяг інформації, що передається по зворотному каналу.

CMTS з підтримкою DOCSIS 1.1 може призначати потокам пріоритети в залежності від типу послуги (Type of service - ToS). При появі пріоритетного (наприклад, голосового) потоку CMTS може надати йому канал "в обхід" черги. Однак саме по собі це не гарантує необхідних характеристик передачі, так як канал все одно виділяється за принципом "краще з можливого" (best effort). Модему теж може задаватися пріоритет. Але він, як правило, поширюється на всі вихідні потоки модему. Така схема дозволяє підвищити якість обслуговування, але, знову ж таки, не гарантує необхідних параметрів передачі. Крім того, призначення єдиного пріоритету знижує ефективність використання

смуги зворотного каналу, оскільки він діє і при передачі неперіоритетних послуг.

У DOCSIS 1.1 набір параметрів QoS задається не модему в цілому, а окремим потокам, з даними різного типу. Резервування смуги, необхідної для передачі потоку з конкретними характеристиками, проводиться тільки на час передачі потоку і при збереженні їм зазначених характеристик. Якщо абонентський модем передає потоки різнорідних даних, то кожному з них присвоюється свій ідентифікатор і призначається режим обслуговування.

DOCSIS 1.1 дозволяє задавати ті ж характеристики, що й DOCSIS 1.0, і, додатково, максимально допустимі затримку передачі і тремтіння (джиттер) сигналу. Однак в рамках режиму "краще з можливого" гарантувати виконання встановлених умов неможливо. Тому в DOCSIS 1.1 додано ще 4 режими надання каналу зв'язку, кожен з яких оптимізований під певний тип послуг, що вимагають дотримання QoS.

- ***Unsolicited Grant Service - UGS*** (надання каналу без додаткового запиту). Після посилки запиту і отримання дозволу абонентським модемом автоматично забезпечується можливість періодичної передачі даних серіями фіксованої довжини. Передача ведеться з гарантованою швидкістю і з гарантованим рівнем тремтіння. Цей режим підходить для передачі голосу через IP.

- ***Real-Time Polling Service - rtPS*** (пріоритетне надання каналу в реальному часі). Абонентського модему періодично надається можливість замовляти сеанс передачі даних на пріоритетних умовах і з необхідними характеристиками каналу. Коли з'являється необхідність передати порцію даних цієї категорії, головний модем може перервати передачу потоків з більш низьким пріоритетом, надавши смугу потоку категорії rtPS. Цей режим може обслуговувати програми, що вимагають передачі у реальному часі серій даних змінної довжини. Він добре підходить для передачі через IP – мережі потокового відео (наприклад MPEG).

- ***Unsolicited Grant Service with Activity Detection - UGS / AD*** (надання каналу без додаткового запиту з виявленням активності передавача). Цей режим є

комбінацією першого (UGS) і другого (rtPS) режимів. Він призначений для послуг з фіксованою швидкістю передачі і фіксованим обсягом пакетів, але характеризуються великими перервами між посилками. Прикладом таких потоків є IP- телефонія. Перерви в передачі голосового потоку абонента можуть складати 50 сек і більше. У проміжках, коли абонент говорить, модем отримує доступ до зворотного каналу в режимі UGS. У проміжках мовчання CMTS виявляє припинення передачі даних і перемикає цю послугу в режим rtPS, тимчасово призупиняючи регулярне надання смуги зворотного каналу. Коли розмова відновлюється, абонентський модем в рамках режиму rtPS відправляє запит на пріоритетне обслуговування, яке відновлюється і ведеться в режимі UGS до чергової паузи.

- ***Non-Real-Time Polling Service*** (пріоритетне надання каналу поза реального часу). Цей режим обслуговування схожий на rtPS. Він також передбачає пріоритетне надання каналу, однак не накладає вимог негайного виконання запиту. Самі запити на надання каналу теж не обов'язково повинні бути періодичними. Цей режим призначений для додатків, які потребують передачі в реальному часі, але яким одноразово може знадобитися велика смуга. Прикладом таких додатків можуть служити Інтернет - ігри. Призначення режиму може здійснюватися за рядом ознак - по MAC адресам, за належністю до певної VLAN, по типу використовуваного IP протоколу, по типу послуги, зазначеної в IP заголовку, і т. д.

Додаткові механізми

Для забезпечення QoS і підвищення ефективності використання смуги в специфікацію DOCSIS 1.1 додатково введені можливості фрагментації і об'єднання IP- пакетів, а також механізм придушення заголовків [О: 4, Д: 1, 2, 3]. Стандарт DOCSIS 1.0 не дозволяє кабельним модемам розбивати великі IP- пакети на дрібні фрагменти і розносити їх передачу в часі. В результаті, через невелику ширину зворотного каналу, іншим модемам доводиться довго чекати можливості виконати передачу. У DOCSIS 1.1 додана можливість розбиття модемами великих кадрів на більш дрібні фрагменти, а також можливість

переставляти в зворотному каналі порції, що формуються додатками з різними вимогами до QoS. Це дозволяє навіть у вузькому каналі гарантувати підтримку заданих меж тремтіння і затримки даних.

Об'єднання невеликих пакетів одного потоку в один, із загальним MAC заголовком - один із способів економії смуги. При цьому модем може переправити об'єднані дані в одному часовому слоті замість того, щоб замовляти окремі для кожного пакета. Стиснення заголовків пакетів відбувається за рахунок виключення з них інформації що повторюється або надлишкової інформації. Це особливо актуально при передачі дрібних, наприклад, голосових пакетів, коли заголовок може виявитися більше корисної інформації.

2.9. Особливості версії DOCSIS 3.0

Основна мета розробки цієї версії - збільшення пропускної спроможності каналів DOCSIS. Ця необхідність продиктована різким зростанням додатків P2P (point-to-point, точка-точка), що включають передачу відео, а також плани використання мереж DOCSIS для надання відео-на-вимогу (VOD). Задачу різкого збільшення пропускної спроможності каналів DOCSIS можна було вирішити тільки "екстенсивним" способом, тобто за рахунок збільшення їх ширини. Колишні версії DOCSIS допускають можливість використання декількох прямих і зворотних каналів, кількість яких обмежується тільки шириною доступного частотного діапазону. Але ці канали працюють незалежно один від одного. Це виключає можливість їх одночасного використання одним кінцевим пристроєм, не кажучи вже про один додаток. Через неможливість гнучкого перерозподілу навантаження використання частотного діапазону було неоптимальним, а деякі додатки, типу VOD, швидко блокують канал.

Таким чином, збільшення пропускної спроможності необхідно проводити за рахунок розширення самих каналів. Це завдання може бути вирішено двома способами. Один з них, запропонований Cisco і Broadcom, передбачає об'єднання декількох каналів на рівні транспортних потоків MPEG-2 TS.

MPEG-2 TS - транспортний формат DVB мереж, який використовується зокрема і для передачі Ethernet кадрів з даними в каналах DOCSIS. Розміри транспортного потоку обмежені шириною фізичного каналу кабельної мережі, що визначається стандартним частотним планом. Для Америки ця ширина становить 6 МГц, а для Європи 7 або 8 МГц. Об'єднання декількох транспортних потоків в один по суті означало б розширення смуги одного фізичного каналу, яке спричинило б за собою перерахунок всієї мережі для дотримання умов щодо шумів і інтермодуляційних спотворень.

Другий варіант запропонований компаніями Arris і Motorola. Він передбачає збереження ширини фізичних каналів, але з можливістю їх об'єднання в один логічний канал (агрегування каналів). У цьому випадку в кожному фізичному каналі формується окремий транспортний потік, але пакети, що відносяться до одного сеансу, можуть розподілятися по декількох каналах. При цьому варіанті дещо менш ефективно використовується транспортна смуга, але зате він і менш витратний в плані впровадження.

Стандарт DOCSIS 3.0 визначає мінімальну кількість фізичних каналів зв'язку, яку має підтримувати обладнання [Д: 3]. І в прямому і в зворотному каналах повинно підтримуватися об'єднання не менше 4 фізичних каналів, а IP пакети, що відносяться до одного сеансу, можуть довільно розподілятися по всім фізичним каналам, включеним в логічний канал. Такий підхід дозволяє передавати до 160 Мб/с у прямому каналі (EuroDOCSIS) і до 120 Мб/с у зворотному. Максимальна кількість каналів явно не обмежена, але для прямого напрямку введена вимога, щоб усі канали, які об'єднуються, розміщувалися у смузі 60 МГц. Це обумовлено складнощами реалізації широкосмугового приймача в кабельному модемі. Кількість прямих каналів, що розміщується в цій смузі, не перевищує семи при смузі 8 МГц і десяти при смузі 6 МГц.

Сам частотний відрізок в 60 МГц може розташовуватися в будь-якому місці частотного діапазону, верхня межа якого піднята до 1002 МГц. Зрушення вгору продиктоване поширенням в США пасивних і активних компонентів мережі доступу, що працюють в смузі до 1000 МГц, хоча робоча смуга основної

маси діючих мереж як і раніше обмежена 862 МГц. Інших обмежень на частотне розміщення каналів стандарт не накладає, хоча вони і можуть бути продиктовані станом спектра або особливостями модуляторів.

Максимальна смуга одного зворотного каналу обмежена 6,4 МГц, що дозволяє передавати до 30 Мб/с. Але кабельний модем повинен підтримувати можливість одночасної передачі як мінімум на 4 каналах. При необхідності вийти в лінію з певним додатком, кабельний модем відправляє запит CMSTS, яка виділяє йому для цієї мети слоти в рамках одного або декількох каналів. Максимальну кількість каналів, якими може оперувати модем, він повідомляє CMSTS при авторизації.

Друга особливість DOCSIS 3.0 в порівнянні з попередніми версіями полягає в підтримці IPv6. Це розширює діапазон доступних адрес.

Третє нововведення - підтримка багатоадресної (multicast) передачі. Вся інформація про характеристики мультикастового трафіку знаходиться на CMSTS, що дозволяє підтримувати розширені механізми управління мультикастовою групою.

Крім того, у новому стандарті з'явилася можливість прив'язки мультикастових послуг не до модему, а до CPE (Customer Premises Equipment), підключеному до модему. Для них можуть підтримуватися механізми доставки мультикастового трафіку і призначатися певний QoS. Остання функція вимагає дотримання QoS також і в мережі за кабельним модемом.

У стандарті також введений додатковий механізм пріоритезації мультикастового трафіку. Для цієї мети вводиться поняття групового сервісного потоку (Group Service Flow) який може посилатися на клас послуги (Service Class Name), в рамках якої реалізується заданий набір механізмів QoS.

У CMSTS введена підтримка проксі для TFTP (Trivial File Transfer Protocol) сервера, що дозволяє прискорити завантаження конфігураційних файлів при одночасному підключенні великої кількості модемів.

Важливим моментом є підвищення безпеки передачі. У DOCSIS 3.0 з'явилася можливість шифрування трафіку модему по AES (Advanced

Encryption Standard) алгоритму із застосуванням 128 бітових ключів. Розширені функції управління безпекою, введена перевірка IP адреси відправника, з'явилася можливість безпечного завантаження програмного забезпечення на модем і ряд інших удосконалень.

2.10. Особливості версій DOCSIS 3.1 та Full Duplex DOCSIS 3.1

DOCSIS 3.1 є новою версією технології, яка дозволяє надавати абоненту доступ до мережі Інтернет зі швидкістю до 10 Гб/с (низхідний потік) та 1 Гб/с (висхідний потік) [Д: 3]. Одним з найбільш важливих аспектів DOCSIS 3.1 є те, що дана технологія підтримує зворотну сумісність. Це дозволяє використовувати існуючі мережі, забезпечуючи при цьому більш високу швидкість передавання даних.

У DOCSIS 3.1 був збільшений діапазон частот до 1218 МГц, а потім і до 1794 МГц. Смуга низхідного каналу може займати від 24 до 192 МГц. У відповідності зі специфікаціями, викладеними в DOCSIS 3.1, кабельні модеми повинні працювати в діапазоні частот від 258 МГц до 1218 МГц (низхідний потік). При цьому підтримка діапазону до 1794 МГц не є обов'язковою. Висхідний потік розташований в нижчому частотному діапазоні, обмеженому зверху 204 МГц. При цьому смуга частот каналу змінюється від 6,4 до 96 МГц. Технологія DOCSIS 3.1 використовує LDPC-кодування (Low-density parity-check code) і модуляцію OFDM - мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (orthogonal frequency-division multiplexing — OFDM), а також забезпечує підтримку QoS і маленьку затримку.

У DOCSIS 3.0 для одного прямого каналу використовується одна несуча частота зі смугою 6 МГц (8 МГц в Європі). Для модуляції цієї частоти використовується QAM з однією несучою (SC-QAM) і символи передаються на цій частоті строго послідовно (рис. 2.6). Якщо з прийомом сигналу виникають проблеми, то модуляцію необхідно зменшувати - не тільки для цієї частоти, але і для всіх інших каналів в мережі. Це означає, що модуляція повинна бути оптимізована під найгіршу частину коаксіальної мережі.

загальну пропускну здатність мережі. Замість того, щоб використовувати один рівень модуляції для всього діапазону, OFDM дозволяє використовувати різні рівні модуляції для кожної піднесучої. Крім того, можна створювати модуляційні профілі таким чином, щоб задавати індивідуальні рівні модуляції для всіх піднесучих і мати при цьому кілька таких профілів.

Візьмемо одну піднесучу як приклад. Кожен профіль має свій рівень модуляції (наприклад, QAM-64, QAM-1024, QAM-2048 або QAM-4096). OFDM може використовувати профіль з найвищим рівнем для даного сегмента HFC-мережі. В одному сегменті це буде QAM-4096, в іншому це може бути QAM-1024. У третьому сегменті на цій частоті може бути занадто велика інтерференція і ця ділянка спектра взагалі буде виключена з профілю і т.д. Як було зазначено вище, усі піднесучі об'єднуються між собою для спільної передачі символів, з яких формуються кодові слова. Піднесучі прив'язуються до кожного символу кодового слова і їх рівень модуляції описується профілем. Профілям, в свою чергу, призначаються буквені позначення (наприклад, A, B, C і D). Таким чином, оптимізація проводиться не тільки для кожної піднесучої окремо, але і для всіх 8000 піднесучих в комплексі. В результаті, замість того щоб оптимізувати модуляцію під найгіршу ділянку мережі, вона може бути оптимізована під найкращу ділянку в будь-який момент часу. Це робить DOCSIS 3.1 набагато більш ефективною технологією, ніж її попередники. Там, де канал на DOCSIS 3.0 міг передавати 6.3 біта на 1 Гц, DOCSIS 3.1 може досягти 10.5 біт на 1 Гц при використанні модуляції QAM-4096. У більш типовому випадку, коли одночасно використовуються кілька рівнів модуляції, DOCSIS 3.1 може досягати 8.5 біт на 1 Гц, забезпечуючи збільшення ефективності на 35% без змін в HFC-мережі.

Для зворотного каналу DOCSIS 3.1 використовує OFDMA - Orthogonal Frequency-Division Multiple Access [Д: 3]. Окремі піднесучі в OFDMA можуть виключатися для забезпечення зворотної сумісності з каналами DOCSIS 2 / 3.0 (рис. 2.7) [Д: 3].

Spectrum Usage Evolution Example					
	Parameter	DOCSIS 3.0		DOCSIS 3.1	
		Current	Stage 1	Stage 2	Stage 3
Downstream	Spectrum (MHz)	54 to 1002	108 to 1002	258 to 1218 with Amp upgrade	500 to 1794 with Tap upgrade
	Modulation	QAM-256	QAM-256	QAM-1024 and higher	QAM-1024 and higher
	Equivalent # of Channels	8	24	158	200
	Throughput (bps)	300M	1G	7G	10G+
Upstream	Spectrum (MHz)	5 to 42/65	5 to 85	5 to 204	5 to 400
	Modulation	QAM-64	QAM-64	QAM-256 and higher	QAM-1024 and higher
	Equivalent # of Channels	4	12	32	60
	Throughput (bps)	100M	300M	1G+	2G+

Рисунок 2.7 – Порівняльні характеристики версій DOCSIS 3.0 та DOCSIS 3.1

Low Density Parity Check

Покращення, досягнуті використанням OFDM, не були б можливі без використання алгоритмів корекції помилок. DOCSIS 3.0 використовує алгоритм попереджуючої корекції помилок з кодом Ріда-Соломона (FEC) і вимірює рівень бітових помилок (BER). BER відноситься до однієї несучої, а OFDM використовує багато. У зв'язку з тим, що OFDM розподіляє передані дані по множині піднесучих, використання BER більше не має сенсу.

DOCSIS 3.1 замість FEC використовує LPDC [Д: 3]. Цей алгоритм працює по всьому діапазону і оцінює помилки не окремих бітів, а кодових слів в цілому. Якщо таку помилку можна виправити, LPDC автоматично це робить, що дозволяє використовувати більш високі рівні модуляції і значно зменшує необхідність повторної передачі кодових слів. LPDC наближує пропускну здатність каналу до теоретичних меж, описаним теоремою Шеннона. Але LDPC має один недолік. Так як цей алгоритм змінює настройки в реальному часі, система може досягти максимальних значень за потужністю і

рівнями модуляції коригуючи помилки що виникають. В якийсь момент помилки стануть некорегованими, що призведе до зниження якості сервісу. Для того, щоб уникнути такої ситуації необхідно більш ретельно тестувати систему.

Версія Full Duplex DOCSIS 3.1 удосконалює стандарт DOCSIS 3.1: значно розширює пропускну здатність, дозволяє забезпечувати роботу симетричних мульти-гігабітних служб передачі даних в рамках існуючої гібридної волоконно-коаксіальної технології (HFC) і забезпечує гарантовану готовність операторів кабельних мереж до приходу нових технологій, таких як віртуальна (VR) і доповнена (AR) реальність. Використання технології Full Duplex DOCSIS забезпечує підтримку мульти-гігабітних симетричних служб завдяки одночасній передачі потоків в одному і тому ж частотному діапазоні, що дає можливість збільшити пропускну спроможність висхідного каналу без зменшення пропускну здатності спадного каналу.

2.11. Алгоритм роботи кабельних модемів

Згідно DOCSIS, для того щоб система була функціональною і перебувала в робочому стані, до її складу обов'язково повинні входити наступні сервери, які відіграють роль інтерфейсу між CMTS і CM [О: 4, Д: 1, 2].

- Сервер протоколу динамічної конфігурації хоста (Протокол Dynamic Host Configuration - DHCP), описаний в RFC 2181. Надає IP-адреси для CM і пов'язаних з ним кінцевих пристроїв.
- Сервер реєстрації часу доби (час доби TOD), описаний в RFC 868. Записує час здійснення подій операційної системи.
- Сервер найпростішого протоколу передачі файлів (Trivial FTP), описаний в RFC 1350. Призначений для реєстрації та завантаження конфігураційних файлів CM для окремих абонентських служб. Ці зміни можуть містити параметри якості обслуговування (QoS), версію основної системи забезпечення конфіденційності (Baseline Privacy - BPI), значення робочої частоти, кількість пристроїв, вузлів і т.п.

У великих системах рекомендується виділити для цих серверів окремі комп'ютери, що забезпечило б швидке реагування системи і масштабованість.

Як видно з рис. 2.8, специфікації DOCSIS диктують умови реєстрації CM. CM при першому включенні перевіряє спадний спектр частот на наявність сумісного RF-каналу, що передає дані, які повністю відповідають фізичному рівню DOCSIS. CMTS періодично надсилає по DS-каналу широкомовлення дескрипторів висхідних каналів (Upstream Channel Descriptor - UCD), з якого кабельні модеми дізнаються призначену їм робочу частоту висхідного потоку. Після цього CM встановлюють частоти і DS.

Періодично CMTS передає в загальних часових слотах низхідного потоку схеми розподілу висхідної смуги частот (тут і далі звані MAP).

CMTS призначає кабельного модему, який починає грубий вибір діапазону потужності (R1 з кроком 3 дБ), тимчасові ідентифікатори служб (код послуги - SID, зазвичай $SID = 0$) і процес конкурентної синхронізації між собою і CMTS, використовуючи загальні часові слоти.

Періодично CMTS посилає "порожні" повідомлення, щоб переконатися в безперервності зв'язку з усіма кабельними модемами свого домену. Коли CM отримує перше "порожнє" повідомлення, він переходить на точний вибір діапазону потужності (R2 з кроком 0,25 дБ).

Після процесу R2 вважається, що CM встановив з'єднання з CMTS. Але якщо 16 послідовних "порожніх" повідомлень будуть втрачені, то це з'єднання розірветься.

CM на конкурентній основі в загальних часових слотах направляє CMTS запит на смугу пропускання, використовуючи тимчасовий SID. CMTS направляє CM відповідь, що дає йому право передавати висхідну інформацію у відповідних часових слотах. Потім CM шукає в мережі сервер DHCP і направляє туди запит. CMTS передає DHCP-підтвердження від сервера DHCP, де вказані IP-адреса, стандартний шлюз, адреси серверів TFTP і TOD і ім'я файлу конфігурації TFTP.

CM послідовно запускає процеси TOD і TFTP. Від сервера TFTP CM отримує файл конфігурації, який містить параметри QoS, захисту, призначені частоти і все образи нового програмного забезпечення.

CM передає цей файл конфігурації CMTS і робить запит на реєстрацію. Якщо конфігураційний файл дійсний, то CMTS присвоює CM постійний SID, а CM - інтерактивний статус.

Після реєстрації CM може активувати алгоритм 56-розрядного шифрування DES, щоб забезпечити безпеку передачі даних протягом всього маршруту між собою і CMTS.

Як тільки CM зареєстрований, його індивідуальний стан може відслідковуватися віддалено за допомогою команд доступу до CMTS. У табл. 2.4 наведені визначення повідомлень про стан, що надходять від універсального широкосмугового маршрутизатора Cisco.

Крім того, DOCSIS визначає загальні специфікації CMTS і CM, що забезпечують функціональну сумісність обладнання різних виробників в одній системі. Ці параметри наведені в табл. 2.5.

Для того щоб досягти або перевищити критерій доступності DOCSIS, в обладнанні повинні бути передбачені засоби шумозниження або воно повинно володіти властивостями, що дозволяють працювати в недружньому висхідному потоці. Для висхідного потоку оператор може вибрати або QPSK, або QAM-16 зі зниженим CNR, але зі зменшеною спектральною ефективністю.

Крім того, можна налаштувати систему упереджаючої корекції помилок (FEC), що дозволяє зменшити кількість даних, зіпсованих шумом. Більш того, оператор може вибрати оптимальну висхідну ширину каналу (BW) для каналів даних в шумному спектрі або в спектрі, призначеному для інших служб.



Рисунок 2.8 - Послідовність дій при реєстрації кабельного модему

Таблиця 2.4 - Визначення команд стану кабельного модему для Cisco CMTS

Повідомлення	Його вміст
Offline	Модем відключений від мережі
Init(r1)	Модему відправлений первинний вибір діапазону
Init(r2)	Модем вибирає діапазон
Init(rc)	Вибір діапазону завершений
Init(d)	Отримано запит DHCP
Init(i)	Отримано відповідь на запит DHCP, призначена IP-адреса
Init(t)	Отримано запит TOD
Init(o)	Отримано запит TFTP
Online	Модем зареєстрований і готовий до отримання даних
Online(d)	Модем зареєстрований, але не має доступу до мережі
Online(pk)	Модем зареєстрований, BPI відкритий, КЕК призначений
Online(pt)	Модем зареєстрований, BPI відкритий, ТЕК призначений
Reject(m)	Модем зробив спробу зареєструватися,
	в реєстрації відмовлено через поганий MIC
Reject(c)	Модем зробив спробу зареєструватися,
	в реєстрації відмовлено через поганий COS
Reject(pk)	Відмовлено в призначенні модему ключа КЕК
Reject(pt)	Відмовлено в призначенні модему ключа ТЕК

Останнім з можливих контрзаходів, на випадок непостійних шумів, є управління спектром, тобто зміна обраної висхідної частоти, модуляції і смуги пропускання каналу, щоб забезпечити надійну передачу даних між CMTS і CM.

У табл. 2.6 наведено основні фізичні характеристики для обладнання стандарту DOCSIS 1.0, контрзаходи для зменшення впливу шумів і відповідні параметри кабельної мережі. На підставі цієї інформації, знаючи реальні характеристики кабельної мережі, оператор може зробити висновок про можливість побудови мережі з використанням цього обладнання.

Таблиця 2.5 - Загальні апаратні специфікації CMTS

Параметр	Характеристика	
Діапазон частот	висхідний потік	5-42 МГц (5-65 МГц поза США)
	низхідний потік	88-860 МГц
Полоса пропускання	висхідний потік	200, 400, 800, 1600, 3200 КГц
	низхідний потік	6 МГц (8 МГц поза США)
Режими модуляції	висхідний потік	QPSK чи 16 QAM
	низхідний потік	64 чи 256 QAM
Символьна швидкість	висхідний потік	160, 320, 640, 1280, 2560 КС/с
	низхідний потік	5.056941 чи 5.360537 КС/с
Діапазон рівня живлення CMTS	висхідний потік	від 8 до 58 dBmV (QPSK)
		від 8 до 55 dBmV (16 QAM)
	низхідний потік	від -15 до +15 dBmV

Таблиця 2.6 - Характеристики СМ

Параметр	Характеристика
Діапазон рівня напруги СМ:	
Вихідний	QPSK: 8-58 дБ/мВ
	16 QAM: 8-55 дБ/мВ
Вхідний	[-15; 15] дБ/мВ
Рівень передачі	[-6; -10] дБ по шкалі С

3. СІМЕЙСТВО ТЕХНОЛОГІЙ ЦИФРОВОЇ АБОНЕНТСЬКОЇ ЛІНІЇ xDSL

Технологія цифрової абонентської лінії використовується для організації мережного доступу відповідно до топології точка-точка. При цьому по існуючих мідних кабелях можна передавати інтегрований потік, що включає комп'ютерні дані, відео та голосові дані. Основна область застосування цього сімейства – високошвидкісний доступ до Інтернет, виділені канали для підключення філій і т.д. Все сімейство технологій xDSL використовує частину смуги пропускання мідного телефонного кабелю та спеціальні методи модуляції [О: 3,4,5, Д: 4].

Для доступу через ADSL потрібні телефонні абонентські закінчення і модеми. З'єднання абонентів з глобальною мережею здійснюється через мультиплексор доступу до цифрового абонентського закінчення (Digital Subscriber Line Access Multiplexer, DSLAM) (рис. 3.1). Для підключення до IP - мережі у нього використовуються WAN-порти (зазвичай, 1 GE), а для підключення клієнтів – DSL-порти, до яких підключається абонентська лінія.

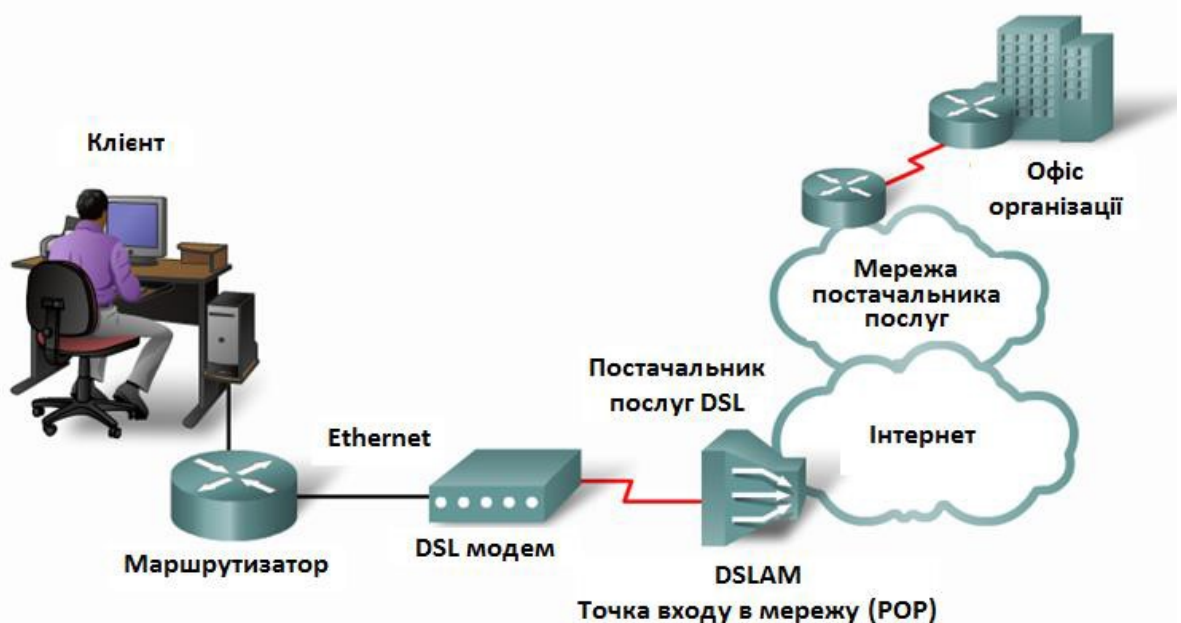


Рисунок. 3.1 - Спрощена структура мережі за технологією DSL

«х» в аббревіатурі визначає різні типи технологій. Найпоширеніші :

ADSL – асиметрична цифрова абонентська лінія (повношвидкісна або Full Rate);

RADSL – адаптивна за швидкістю асиметрична цифрова абонентська (динамічно налаштовувана швидкість передачі під час установалення з'єднання виходячи з якості і довжини фізичного каналу);

HDSL – високошвидкісна цифрова абонентська лінія;

SDSL – високошвидкісна цифрова абонентська лінія на одну пару;

VDSL – надвисокошвидкісна цифрова абонентська лінія.

Основними моментами, які відрізняють одну технологію від іншої, є частотні діапазони та способи організації частотних каналів, відмінності симетричності трафіку (вхідний, вихідний), використовувані методи модуляції, підтримувані довжини ліній і швидкості передачі (таблиця 3.1).

Для забезпечення високої швидкості в DSL технологіях використовують техніку цифрової обробки сигналу зі спеціальними методами модуляції.

В ADSL використовують два методи модуляції: амплітудно-фазова із придушенням несучої (CAP) і дискретна мультиносова модуляція (DMT) [О: 3,4,5]. Як стандарт прийнята DMT-модуляція – більш продуктивна, менш чутлива до перешкод. CAP – застосовується в R-ADSL.

Таблиця 3.1 - Порівняльні характеристики технологій

Технологія	Швидкість	Відстань	Застосування
ADSL R-ADSL	1,5 – 8 Мб/с (down) 16 – 1024 Кб/с (up)	(до 6 км) (4 км)	Доступ до Інтернет, доставка відео і ТВ-сигналу
HDSL	2048 Кб/с (повний дуплекс 3 пари)	до 4-х км	Виділені лінії, телефонний винос для підключення до АТС
SDSL	2 Мб/с (повний дуплекс 1 пара)	до 3-х км	Виділені лінії, телефонний винос для підключення до АТС
VDSL	2-52 Мб/с. (down) 1,5-16 Мб/с (up)	300 м – 1,5 км	Високошвидкісний доступ в Інтернет, передача відео та ТВ сигналів високої чіткості

Для створення декількох частотних каналів (для прийому і передачі) частотний діапазон розбивається на піддіапазони. При цьому може бути використане частотне мультиплексування (FDM) і метод ехокомпенсації.

При використанні частотного мультиплексування виділяється один частотний діапазон для спадного і другий для висхідного каналів. Потім діапазон для спадного потоку ділиться на кілька частотних каналів (до 256), які, у принципі, можуть мати різну ширину. Висхідний потік також може піддаватися частотному мультиплексуванню (реалізоване в ADSL).

При застосуванні методу ехокомпенсації весь частотний діапазон використовується для організації спадного та висхідного каналів. Ширина смуги висхідного каналу буде рівною або буде трохи менше смуги спадного каналу (реалізоване в HDSL, SDSL, SHDSL, VDSL).

3.1. Особливості технології ADSL

На одній мідній парі дозволяє одночасно вести передачу комп'ютерних даних і підтримувати звичайну аналогову телефонну лінію (рис. 3.2). У приміщенні клієнта встановлюється частотний роздільник, який виконує поділ фільтрацію частот між ADSL- модемом і звичайним аналоговим телефоном, забезпечуючи їх спільне співіснування.



Рисунок 3.2 - Схема підключення

Частотний роздільник (Pots Splitter) – являє собою пасивний фільтр для відділення 4 КГц – телефонного сигналу від DSL-сигналу більш високої

частоти (до 1,1 МГц). Частотний діапазон ADSL-сигналу починається від 26 КГц, включає 256 каналів по 4 КГц і захисні смуги між ними (рис. 3.3).

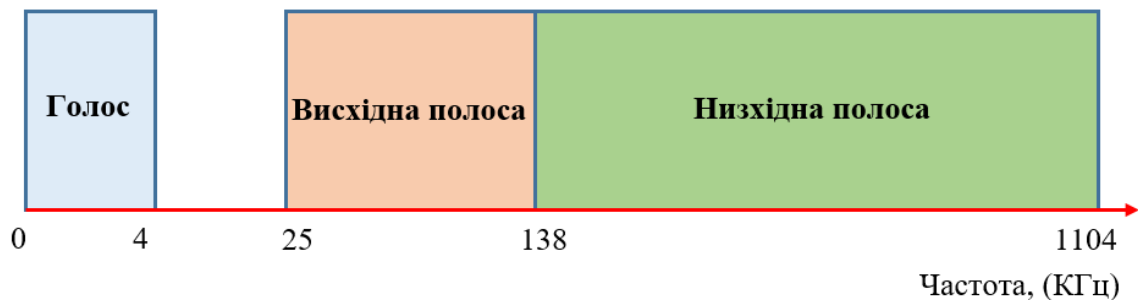


Рисунок 3.3 - Розподіл смуги пропускання абонентського закінчення між каналами ADSL

Для асиметрії низхідної і висхідної швидкостей смуга пропускання абонентського закінчення ділиться між каналами також асиметрично. Оскільки частотні діапазони для висхідного і спадного каналів не збігаються, то, у результаті такого частотного поділу з'єднати два ADSL модеми «спина до спини» не можна. Стандартне підключення: з'єднання ADSL-модему з DSL-комутатором.

Основною незручністю ADSL технології є необхідність установки частотного фільтра на стороні абонента. У той же час усереднена пропускна здатність магістралі Internet залежить від багатьох факторів (завантаження магістральних каналів, затримки на маршрутизаторах і т.п.) і, за оцінками, становить 400-500 Кб/с. Тобто 10% від пропускної здатності ADSL технології цілком достатньо для Internet трафіку.

З метою здешевлення технології (за рахунок зниження швидкості) була затверджена специфікація ITU-T G.992.2, що одержала назву G.Lite (SplitterLess ADSL). Вона не вимагає установки частотного фільтра на стороні абонента. Пропускна здатність такої технології приблизно в 4 рази нижче в порівнянні зі звичайною ADSL технологією.

Відсутність частотного фільтра і використання загальної проводки для передачі голосу і даних створює додаткові шуми, найпростішим способом

позбавитись від яких є установка частотного фільтра між телефоном і настінною розеткою.

Для сумісності використання ADSL і ISDN стандарт ADSL був розділений на 2 версії: AnnexA (для звичайних телефонних ліній) і AnnexB (для ISDN мережі).

У другому варіанті використовується більш вузький частотний діапазон для висхідного потоку (173-276 КГц), що дозволяє звільнити частотний діапазон до 120 КГц для сигналів ISDN мережі.

Подальшим розвитком стандарту є [О: 3,4,5]:

- ADSL2 – G.992.3, G.992.4
- ADSL2+ - G.992.5
- ADSL2++
- R-ADSL2.

В ADSL2 використовується той же частотний діапазон, що й у звичайному ADSL (26 КГц – 1,1 МГц), але за рахунок більш ефективних методів модуляції досягається максимальна швидкість 12 Мб/с, при тих же відстанях передачі (а іноді й набагато більших).

В ADSL2+ вдвічі збільшений частотний діапазон (до 2,2 МГц), що дозволило забезпечити максимальні швидкості до 24 Мб/с (спадний канал, висхідний канал – 2 Мб/с; максимальна відстань – до 1,5 км).

ADSL2++ поки не стандартизований, в ньому частотний діапазон розширено до 4,4 МГц з максимальною швидкістю до 48 Мб/с спадний потік і 3 Мб/с – висхідний.

R-ADSL2 являє собою подальший розвиток ADSL2, в якому за рахунок більш ефективного використання частотних піддіапазонів прямого і зворотного каналів вдалося збільшити максимальну відстань до 6,5 – 7 км.

На практиці, за наявності сумісного ADSL абонентського модему, вибір однієї з перерахованих технологій здійснюється шляхом програмних налаштувань DSL-комутатора.

3.2. Особливості технології SHDSL

Подальшим розвитком HDSL і SDSL технологій є технологія SHDSL (G.Shdsl) [О: 3,4,5], у якій за рахунок більш ефективного методу модуляції TC-РАМ (трелліс-кодування з використанням АІМ), був знижений частотний діапазон (до 300 КГц), але при цьому пропускна здатність зросла до 2,3 Мб/с (мінімальна – 192 Кб/с, максимальна – 2320 Кб/с, максимальна відстань: при мінімальній швидкості – 6 км, при максимальній швидкості – 2 км на мідних кабелях з діаметром провідника 0,4 мм (26AWG – найгірший кабель)).

Існує також версія, що може використовувати 2 фізичні лінії (2 пари) і забезпечувати максимальну швидкість 4624 Кб/с.

Специфікація на SHDSL – G.991.2.

Дана технологія є симетричною з погляду пропускної здатності каналів прийому/передачі, але частотні діапазони для цих каналів трохи відрізняються. Тому якщо SDSL- і HDSL-модеми допускали інтерфейсне з'єднання «спина до спини», то SHDSL-модеми вимагають переконфігурації одного з модемів у парі. Стандартно такі модеми сконфігуровані як CPE пристрої (комунікаційне периферійне обладнання), але за допомогою наявних програмних засобів можуть бути сконфігуровані як CO пристрої (комунікаційний офіс).

3.3. Особливості технології VDSL

Займає частотний діапазон 900 КГц – 12 МГц.

При цьому існує 2 типи VDSL пристроїв:

- одні пристрої підтримують модуляцію QAM (квадратурна амплітудна модуляція), що дозволяє забезпечувати максимальну швидкість 16 – 18 Мб/с на відстані 1,2 – 1,4 км;
- інші пристрої підтримують модуляцію DMT (дискретна мультитональна модуляція), що дозволяє забезпечувати максимальну швидкість до 52 Мб/с на таких самих відстанях.

VDSL-модеми, як і ADSL-модеми, можуть бути використані для передачі даних і голосу через одну телефонну пару (зазвичай вже мають вбудований частотний фільтр для підключення телефону).

VDSL-модеми дозволяють здійснити підключення «спина до спини», але при цьому, зазвичай, СО модем сконфігурований на заводі.

3.4. Особливості технології IDSL

Розроблена як альтернативне рішення до інтерфейсу ISDN BRI, що забезпечує таку ж швидкість передачі – до 128 Кб/с. Використовується, коли нема необхідності у високих швидкостях передачі або фізичні параметри лінії не дозволяють отримати більш високу пропускну здатність.

4. ТЕХНОЛОГІЇ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ (PON)

Технологія PON дозволяє на оптичних каналах передачі будувати розгалужені мережі по топології «дерево» або «зірка» (з'єднання «точка-багатоточка») без проміжного активного мережного обладнання для підключення користувачів до загального оптичного каналу передачі [О: 3,4, Д: 5,6]. Технологія PON дозволяє будувати інтегровані мультисервісні мережі доступу для надання абонентам набору послуг (голос, відео, дані) через IP-мережу, які одержали назву Triple Play (потрійна послуга). Технологія PON полягає в тому, що між центральним вузлом, який називається OLT (Optical Line Terminal – оптичний термінал), та віддаленими абонентськими вузлами – ONU (Optical Networking Unit – оптичний мережний пристрій), створюється повністю пасивна оптична мережа на одномодовому кабелі, яка має топологію дерева. В проміжних вузлах дерева розміщуються пасивні оптичні розгалужувачі – спліттери (рис. 3.4). Спліттер складається з декількох волокон, що зварені один з одним спеціальним чином на ділянці довжиною 2-5 міліметри. Співвідношення потужностей сигналів у вихідних волокнах

(коефіцієнт розподілу) визначається вимогами до топології мережі та може бути підібране вибором необхідного типу спліттера.

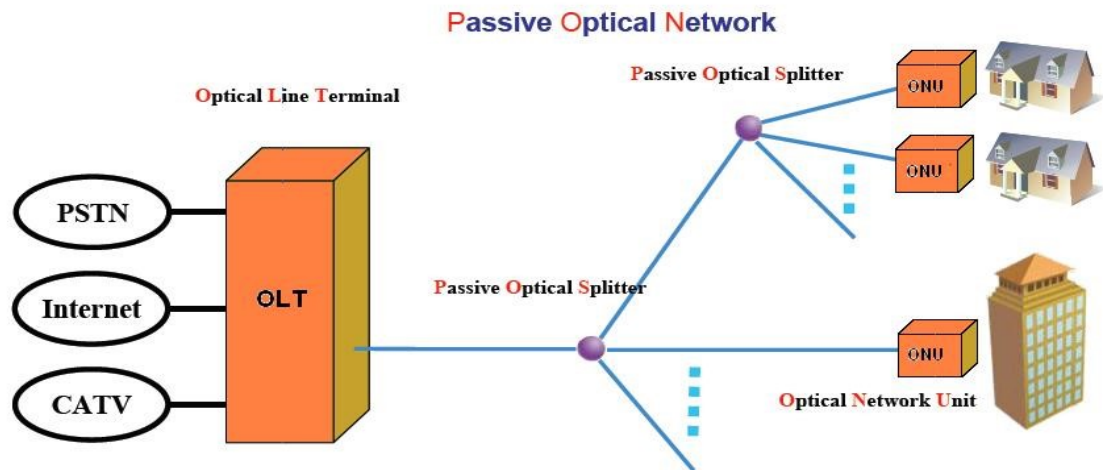


Рисунок 3.4 - Спрощена структура мережі

У випадку, коли потужність сигналу ділиться порівну, ослаблення, внесене самим дільником, становить близько 3 дБ, і ще близько 1 дБ губиться на з'єднаннях – зварених або комутованих. Коефіцієнти ослаблення в прямому і зворотному каналах збігаються, а абоненти, завдяки малому рівню відбитого сигналу, не «бачать» один одного і можуть спілкуватися тільки через головний пристрій OLT. Для поділу сигналів, що поширюються в різних напрямках, використовують лазери з різною довжиною хвилі (наприклад, 1490 нм на PON-комутаторі і 1310 нм на PON-модемах) і вибірні фотоприймачі, налаштовані на відповідні довжини хвиль (1310 нм на PON-комутаторі та 1490 нм на PON-модемах).

Число абонентських вузлів, підключених до одного порту OLT обмежено бюджетом потужності (затухання сигналу на спліттерах та оптичних лініях) та максимальною швидкістю передачі. Перевагами архітектури PON є: відсутність проміжних активних вузлів, економія волокон та оптичних інтерфейсів на обладнанні, легкість підключення нових абонентів, зручність в обслуговуванні

(підключення, відключення чи вихід з ладу одного чи декількох абонентських вузлів не впливає на роботу інших).

Деревовидна топологія P2MP (Point to multipoint) дозволяє оптимізувати розміщення оптичних розгалужувачів виходячи з реального розміщення абонентів, зменшити витрати на прокладку оптичного кабелю та експлуатацію кабельної мережі.

Можливі наступні варіанти побудови мережі доступу до послуг (FTT – Fiber To The) (рис. 3.5):

- FTTN (доведення волокна до житлового будинку/квартири),
- FTTB (доведення волокна до будівлі),
- FTTC (доведення волокна до місця, де розміщено розподільчу коробку),
- FTTCab (доведення волокна до розподільчої шафи).

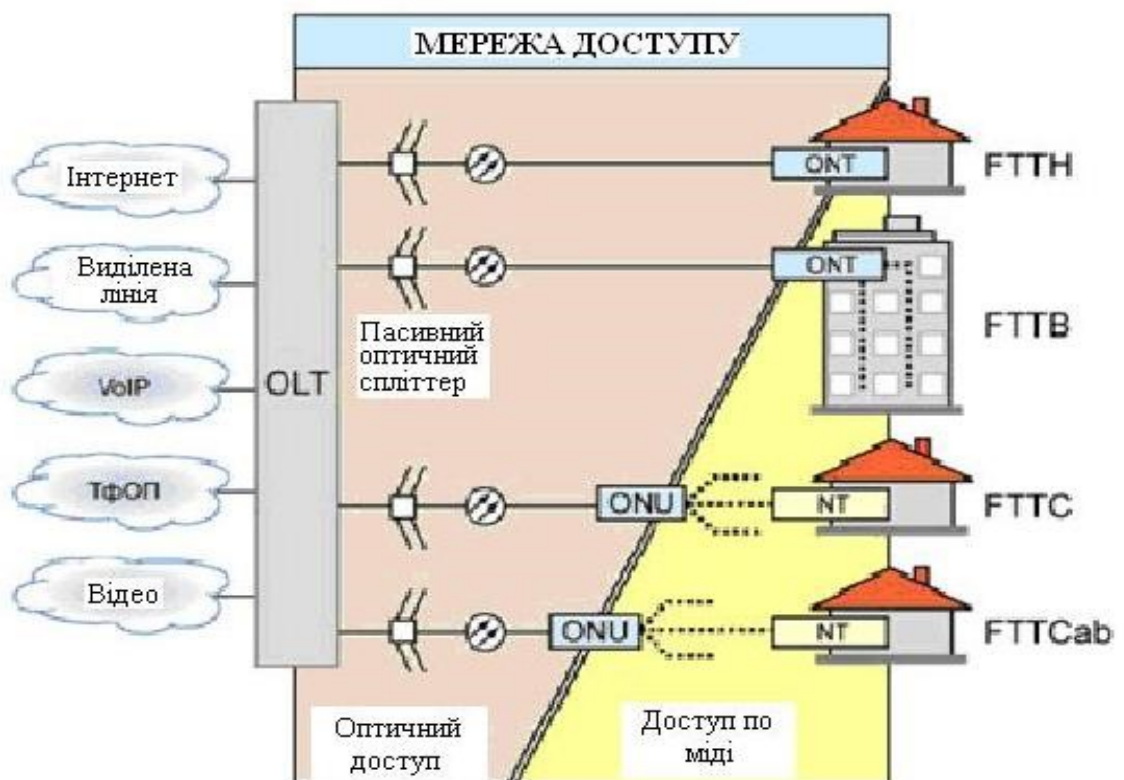


Рисунок 3.5 - Варіанти використання технології PON

Деякі оператори вважають економічно недоцільним надання всіх послуг у середовищі IP. Для надання послуг звичайного кабельного телебачення в прямому каналі зарезервований діапазон довжин хвиль 1550 нм. Сигнал, що формується традиційними головними станціями кабельного телебачення, через пристрій спектрального ущільнення каналів (WDM – ущільнення по довжинах хвиль) вводиться в мережу паралельно з IP- потоком. На стороні абонента після оптичного спліттера встановлюється WDM-спліттер, що вилучає випромінювання з довжиною хвилі 1550 нм і передає його на підсилювач телевізійних сигналів, до якого може бути підключений аналоговий або цифровий телевізійний приймач (рис. 3.6).

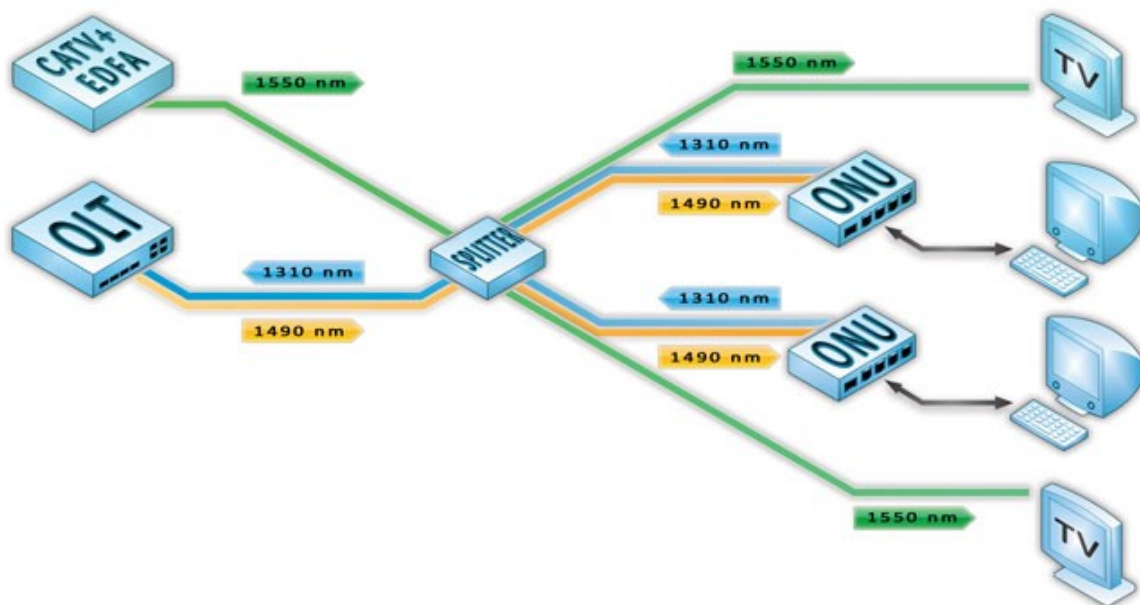


Рисунок 3.6 - Використання PON для передачі сигналів CATV

4.1. Різновиди технології PON

На даний час існують такі технології PON : APON (ATM PON), BPON (BroadBand PON), GPON (Gigabit Ethernet PON), GPON (Gigabit PON) [О: 3,4, Д: 5,6]. Основна різниця між технологіями полягає у протоколах передачі даних, а відповідно, і форматах кадрів. Наприклад, в GPON довжина кадру 1518 байт у відповідності до IEEE 802.3. APON використовує передачу даних в

кадрах фіксованої довжини – 53 байта (АТМ - комірка: 48 байт – блок даних та 5 байт – заголовок). Ефективність APON при передачі IP-трафіку значно нижча, за рахунок дефрагментації IP-пакетів в АТМ - комірки (додаткова часова затримка та зайве навантаження обладнання).

Порівняльні характеристики даних технологій наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Порівняльні характеристики технологій

Стандарти Параметри	ITU-TG.983 APON(BPON)	IEEE 802.3ah GEPON	ITU-T G.984 GPON
1	2	3	4
Послуги	Triple Play + цифрове чи аналогове ТБ	Triple Play + цифрове чи аналогове ТБ	Triple Play + цифрове чи аналогове ТБ
Тип кадру	Комірки АТМ	Кадри Ethernet (до складу яких входить заголовок TDM)	Кадр SDH
Максимальна кількість гілок дерева PON	32	32 (64)*	64 (128)*
Довжина хвилі для низхідного (DS) та висхідного (US) потоків	DS: 1480-1500 US: 1260-1360	DS: 1480-1500 US: 1260-1360	DS: 1480-1500 US: 1260-1360
Максимальна відстань (в залежності від потужності випромінювання лазера)	Клас А (5-20 дБ), 10 км Клас В (1-25 дБ), 20 км	Клас А (5-20 дБ), 10 км Клас В (1-25 дБ), 20 км	Клас А (5-20 дБ), 10 км Клас В (1-25 дБ), 20 км Клас С (15-30 дБ), 20 км
Продовження таблиці 3.2			
1	2	3	4
Шифрування даних	AES-128 шифрування корисного завантаження АТМ-комірки	AES-128 шифрування корисного завантаження Ethernet-кадру	AES-128 шифрування корисного завантаження SDH-кадру
Швидкість передачі	DS:155, 622 Мб/с US: 155, 622 Мб/с	DS: 1 Гб/с US: 1 Гб/с (1,25 Гб/с розширеної послідовності 8B/10B)	DS: 1,2 Гб/с, 2,4 Гб/с US: 155 Мб/с, 1,2 Гб/с, 2,4 Гб/с
Базовий протокол	АТМ	Ethernet	SDH
Лінійний код	NRZ	8B/10B	NRZ
Вартість обладнання	Середня	Середня	Висока

* - залежить від виробника обладнання

4.2. Особливості технології GPON

В GPON процес передачі даних з OLT до багатьох ONU відрізняється від передачі даних в зворотному напрямі (рис. 3.7, 3.8) [О: 3,4, Д: 5,6].

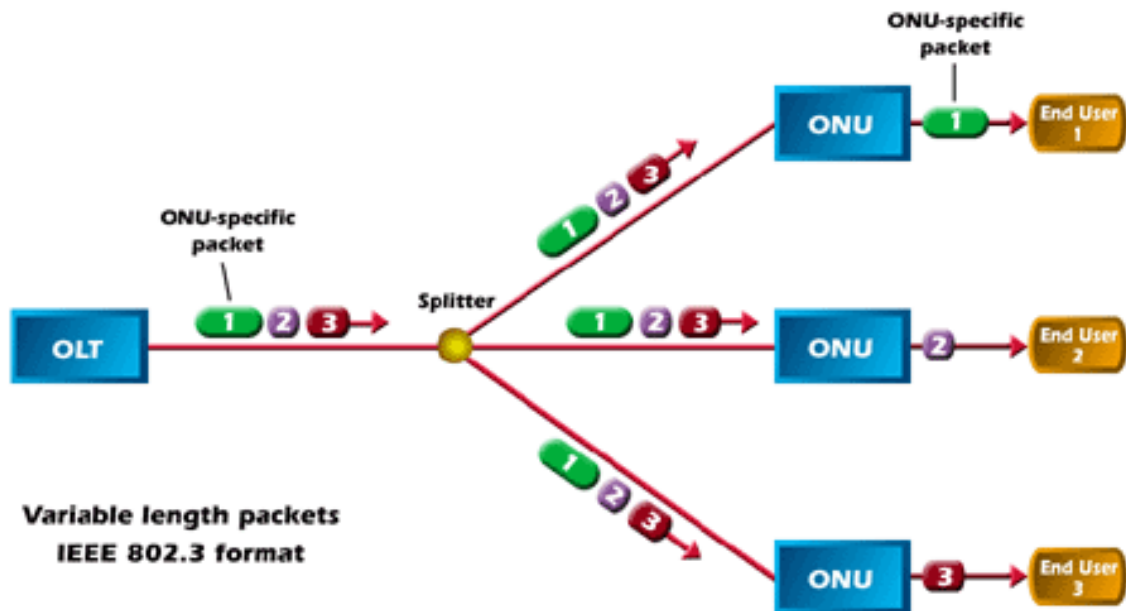


Рисунок 3.7 - Низхідний трафік в GPON

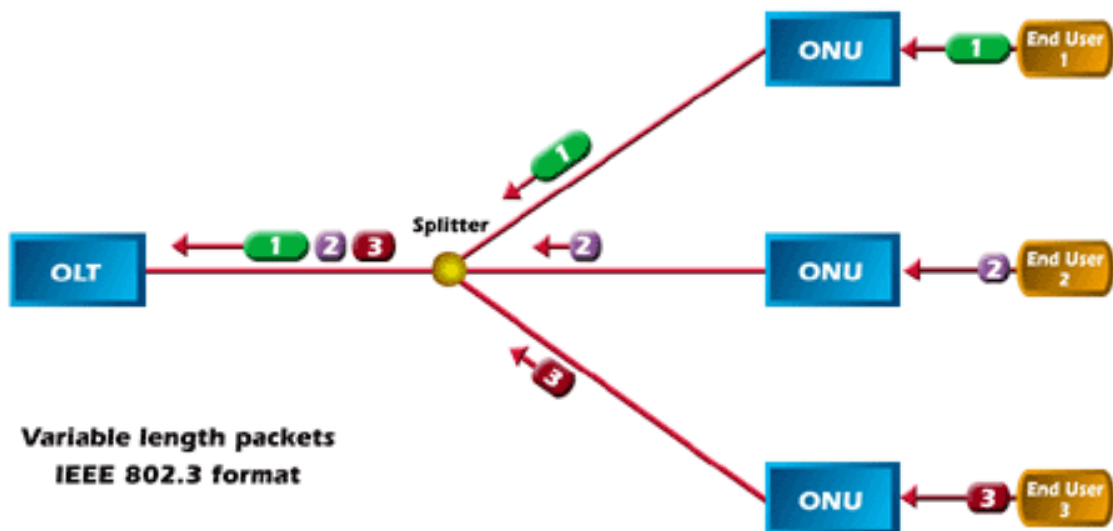


Рисунок 3.8 - Висхідний трафік в GPON

Дані – це широкомовний потік з OLT до багатьох ONU, який містить кадри змінної довжини (до 1518 байтів) у відповідності до протоколу IEEE 802.3. Кожен кадр несе заголовок, який унікально ідентифікує його як дані,

призначені для ONU–1, ONU–2, чи ONU–3. Також, деякі кадри можуть бути призначені для усіх ONU (broadcast packets), чи до окремої групи ONU (multicast packets). Спліттери розділяють трафік на окремі сигнали, кожен з яких несе всі дані. Коли дані досягають до конкретного ONU, пристрій приймає тільки ті кадри, які призначені для нього та відкидає кадри, призначені для інших ONU (принцип роботи подібний до принципу роботи звичайної некомутованої мережі Ethernet).

Для організації висхідного трафіку використовується технологія TDM. Для кожного ONU виділяється свій тайм-слот. Тайм-слоти синхронізовані, тому колізії між кадрами від різних ONU не виникають. Така процедура реалізована у вигляді протоколу управління та пріоритезації трафіку – MPCP (Multi-Point Control Protocol).

4.3. Формат кадру GEPON

Низхідний потік розділений на інтервали фіксованої довжини, в кожен з яких передається Ethernet кадр змінної довжини. На початок кожного кадру додається синхронізуючий байт, який передається кожні 3 мс для синхронізації ONU з OLT. Кожен пакет, що адресований конкретному ONU, позначений номером N (1 для першого) (рис. 3.9). Пакети відповідають стандарту IEEE 802.3. Швидкість низхідного потоку дорівнює 1 Гб/с.

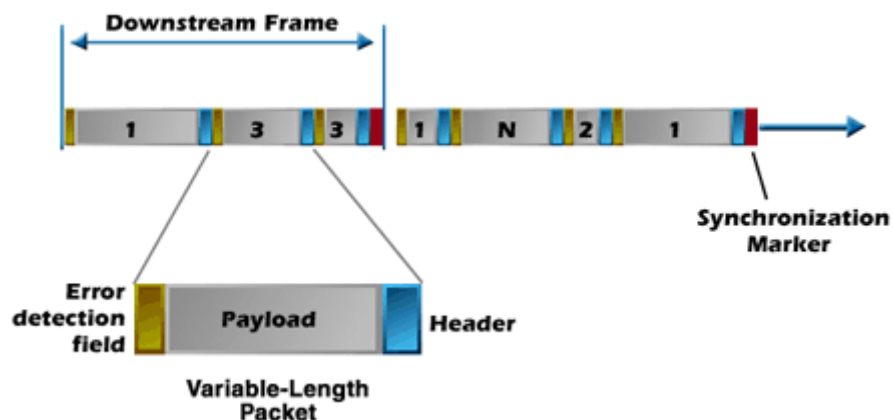


Рисунок 3.9 - Потік кадрів низхідного трафіку в GEPON

Стандартні Ethernet кадри в PON трохи модифікуються під специфіку роботи в загальному середовищі, що розділяється за принципом TDM. Структура стандартного Ethernet кадру (IEEE 802.3), PON кадру (IEEE P802.3ah) і керуючого кадру IEEE P802.3ah представлена на рис. 3.10 [Д: 6].



Рисунок 3.10 – Формати кадрів IEEE 802.3 та IEEE P802.3ah

Преамбула стандартного кадру Ethernet (рис. 3.8 а), модифікується додаванням кількох службових полів (рис. 3.8 б):

- SOP (Start Of Packet) - 1 байт, вказує на початок кадру;
- резервне поле, 4 байта;
- LLID (Logical Link Identifier) - 2 байта, вказує на індивідуальний ідентифікатор вузла PON. LLID використовується при емуляції з'єднань точка-точка і точка-мультиточка в мережі PON. Перший біт поля вказує режим передачі кадру (unicast або multicast). Решта 15 біт містять індивідуальну адресу вузла PON;

- CRC (Circle Redundancy Check) - 1 байт, контрольна сума кадру (стандарт P802.3ah).

При виході кадру з мережі GE-PON преамбула кадру перетворюється до стандартного вигляду - тег видаляється. Наприклад, в прямому потоці OLT модифікує преамбулу кожного, кадру 802.3, що надходить в PON, зокрема, в преамбулу додається спеціальний тег LLID. Цей тег видаляється відповідним підрівнем на ONU і, таким чином, відбувається відновлення преамбули. Вузол ONU в нормальному режимі роботи (коли він вже зареєстрований OLT), обробляє тільки ті кадри, в преамбулі яких ідентифікатор LLID збігається з власним LLID. Решта полів кадру PON збігаються з полями стандартного кадру Ethernet.

- DA (Destination Address) - 6 байт, вказує MAC-адресу станції призначення. Це може бути фізична адреса вузла (unicast), групова адреса (multicast) або ширококомовна адреса (broadcast);
- SA (Source Address) - 6 байт, вказує MAC-адресу станції відправника;
- L / T (Length / Type) - 2 байта, містить інформацію про довжину або тип кадру;
- Поле даних, змінної довжини;
- PAD (наповнювач) - поле використовується для доповнення кадру до мінімального розміру;
- FCS (Frame Check Sequence) - 4 байта, контрольна сума кадру, обчислена з використанням циклічного надлишкового коду;
- OpCode (Optional Code) - 2 байта, уточнює тип керуючого кадру. Існують дві категорії керуючих кадрів, які відрізняються значенням цього поля: повідомлення GATE, що генерується OLT, і повідомлення REPORT, що генерується ONU;
- TS (Time Stamp) - 4 байта, містить часову мітку відправника;
- message - 40 байтів. В цьому полі міститься службова інформація, необхідна для роботи протоколу MPCP.

OLT і ONU забезпечують інкапсуляцію даних в модифіковані Ethernet кадри стандарту IEEE P802.3ah. На фізичному рівні використовується логічне надлишкове кодування 8B/10B.

Остаточний алгоритм роботи мережі PON виглядає наступним чином [Д:6]:

- ONU «слухає лінію»;
- OLT отримує кадр стандарту IEEE 802.3 з WAN- порту і модифікує його під стандарт IEEE P802.3ah;
- OLT відсилає кадр конкретному адресату (ONU);
- усі ONU отримують кадр, але тільки адресат залишає його собі - інші ONU кадр відкидають;
- ONU модифікує кадр стандарту IEEE P802.3ah під стандарт IEEE 802.3 і передає його через LAN- інтерфейс кінцевому вузлу;
- ONU модифікує кадри, які надходять від вузлів на LAN- інтерфейс, зі стандарту IEEE 802.3 під стандарт IEEE P802.3ah і буферизує їх;
- OLT дозволяє передачу кадрів конкретному ONU;
- ONU виконує передачу кадрів протягом виділеного для нього тайм-слоту, після чого зупиняє передачу і знову «прослуховує» лінію;
- OLT отримує від ONU кадр стандарту IEEE P802.3ah, модифікує його під стандарт IEEE 802.3, після чого передає його на WAN- порт.

Алгоритм роботи мережі PON по перетворенню кадрів з одного стандарту в інший представлено на рис. 3.11.



Рисунок 3.11 - Алгоритм роботи мережі PON по перетворенню кадрів

У висхідному напрямку використовується TDMA технологія для виділення тайм-слотів для передачі даних від кожного ONU.

4.4. Особливості роботи протоколу MPCP

Для виділення OLT часових тайм-слотів ONU групою IEEE 802.3ah був розроблений протокол MPCP (Multi-point Control Protocol) [Д: 6]. Цей протокол базується на двох повідомленнях протоколу Ethernet: GATE і REPORT. Повідомлення GATE надсилається від OLT до ONU і використовується для присвоєння тайм-слотів. Повідомлення REPORT використовується ONU для інформування OLT про свій стан (наповненість буфера і т. і.), щоб допомогти йому прийняти правильне рішення про виділення тайм-слоту. Як GATE, так і REPORT-повідомлення є кадрами управління MAC (тип кадру 88-08).

Існує два режими роботи MPCP: автодетектування (ініціалізація) і нормальний (поточної роботи з виділення часовим інтервалів). Режим автодетектування використовується для детектування ONU, які підключилися до OLT, і визначення RTT (Round-trip time - час, потрібний для пересилання сигналу від OLT до ONU, а потім у зворотному напрямку) і MAC- адреси таких ONU. Нормальний режим використовується для присвоєння тайм-слотів всім ONU, які пройшли ініціалізацію. Враховуючи, що ініціалізації можуть потребувати декілька ONU одночасно, автодетектування є процедурою, яка передбачає конкуренцію. Ця процедура реалізується наступним чином.

1. OLT виділяє стартовий тайм-слот, протягом якого ще неініціалізоване ONU може виконати передачу. Тривалість такого тайм-слоту ініціалізації повинна дорівнювати $\langle \text{transmission size} \rangle + \langle \text{maximum round-trip time} \rangle - \langle \text{minimum round-trip time} \rangle$, де $\langle \text{transmission size} \rangle$ - розміру вікна передачі (transmission window), яке ONU, що ініціалізується, може використовувати.

2. OLT надсилає повідомлення ініціалізації GATE, яке повідомляє про початок ініціалізації тайм-слоту і про його протяжність. При передачі цього

повідомлення на протокольний MAC-рівень, MPCP присвоїть йому часову мітку, пов'язану з його локальним часом.

3. Тільки неініціалізовані ONU можуть відповісти на повідомлення ініціалізації GATE. Після отримання повідомлення ініціалізації GATE, ONU встановить локальний час відповідно до отриманої в повідомленні GATE часової мітки.

4. Коли локальні таймери розміщені в ONU вказують на початок часу ініціалізації, ONU передасть своє повідомлення ініціалізації REPORT. Повідомлення REPORT буде містити адресу ONU і часову мітку, що характеризує локальний час ONU, коли було надіслано повідомлення REPORT.

5. Коли OLT отримує повідомлення REPORT від неініціалізованого ONU, воно визначає його MAC-адресу та RTT. Як показано на рис. 3.12, RTT для ONU дорівнює різниці часів отримання повідомлення REPORT, яке надійшло на OLT, і часової мітки, що міститься в REPORT.

Враховуючи що кілька неініціалізованих ONU можуть надати відповідь на одне і те ж повідомлення GATE, повідомлення REPORT від різних ONU можуть стикатися (виникає колізія). В цьому випадку ONU, чиї повідомлення REPORT зіткнулися, не отримають тайм-слоту. Якщо ONU не отримує тайм-слоту в межах інтервалу очікування (тайм-ауту), воно робить висновок, що виникла колізія, і спробує повторити ініціалізацію, пропустивши випадкове число ініціалізаційних повідомлень GATE. При повторних колізіях псевдовипадкова затримка подвоюється.

Процедура нормального режиму роботи протоколу MPCP виглядає наступним чином (важливо зауважити, що MPCP не пов'язаний ні з якою конкретно схемою виділення смуги пропускання ONU; він є протоколом, який забезпечує транспортування таких рішень від OLT до ONU).

1. Від рівня, який розташований вище (клієнт управління MAC), MPCP отримує запит для передачі повідомлення GATE відповідному ONU з наступною інформацією: час, коли ONU повинно почати передачу і тривалість цієї передачі (рис. 3.13).

2. MPCP рівень (в OLT і кожному ONU) підтримує роботу таймера. Після передачі повідомлення GATE від вищого рівня до MAC, MPCP формує часову мітку пов'язану з його локальним часом.

3. Після отримання ONU повідомлення GATE з його власною MAC-адресою (такі повідомлення завжди юнікастові), ONU запрограмує локальні реєстри на заданий час початку і тривалості передачі. ONU також перевірить, чи відповідає час приходу повідомлення GATE часовій мітці, що міститься в повідомленні. Якщо різниця значень перевищує деякий заздалегідь встановлений поріг, ONU зробить висновок, що втрачена синхронізація, і перейде в режим ініціалізації. В цьому режимі ONU заборонено здійснювати передачу. Воно буде проводити моніторинг вхідного трафіку, очікуючи наступного ініціалізаційного повідомлення GATE.

4. Якщо час отримання повідомлення GATE відповідає значенню часової мітки, що міститься в повідомленні GATE, ONU налаштує власний таймер відповідно до отриманої часової мітки. Коли значення локального таймеру досягне значення 'початок передачі', ONU почне передачу. Процес передачі може включати в себе пересилання декількох кадрів Ethernet. ONU гарантує, що кадри не будуть фрагментовані. Якщо передача чергового кадру вже не вкладається в час, що залишився для передачі, пересилання кадру буде відкладено до настання часового інтервалу.

Повідомлення REPORT надсилаються ONU в рамках виділеного вікна (часового інтервалу передачі) разом з інформаційними кадрами. Повідомлення REPORT можуть бути послані автоматично або за запитом. Повідомлення REPORT генерується на рівні клієнта управління MAC і за часом прив'язані до MAC управління (рис. 3.14). Зазвичай, у повідомленнях REPORT міститься бажаний розмір наступного часового інтервалу для передачі, який визначається рівнем заповнення буфера ONU кадрами. При запиті часового інтервалу ONU повинно враховувати додаткову надмірність, зокрема 64-бітову преамбулу кадру і 96-біт міжпакетної щілини (IFG - Inter-frame Gap) між кадрами.

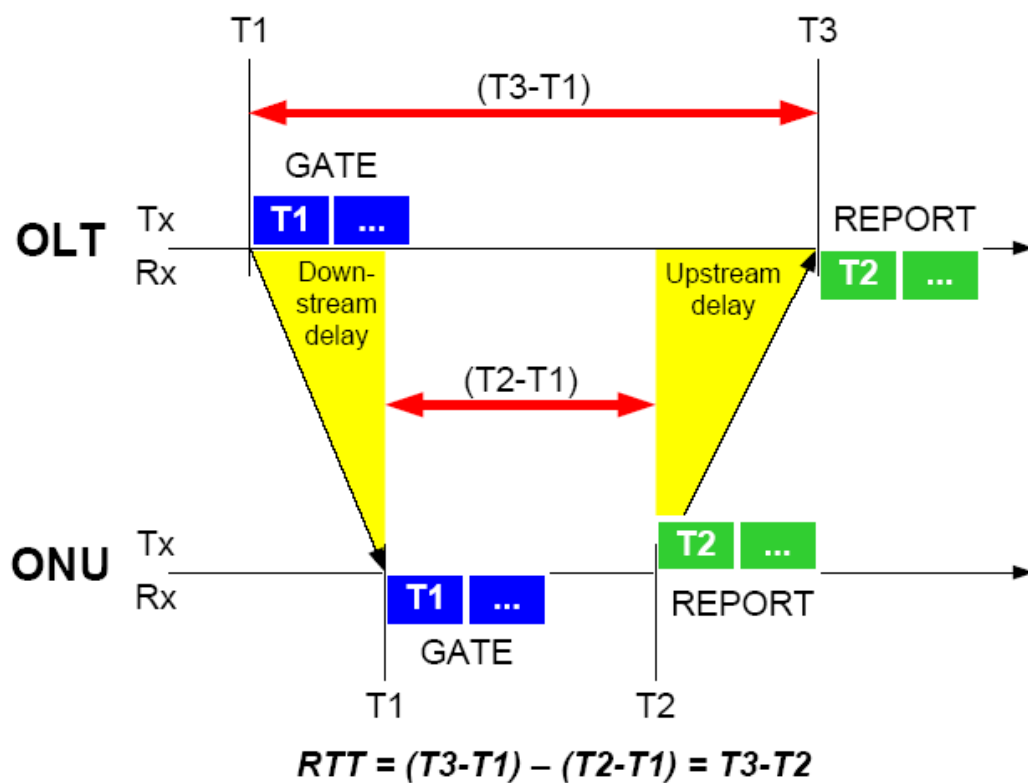


Рисунок 3.12 - Визначення RTT

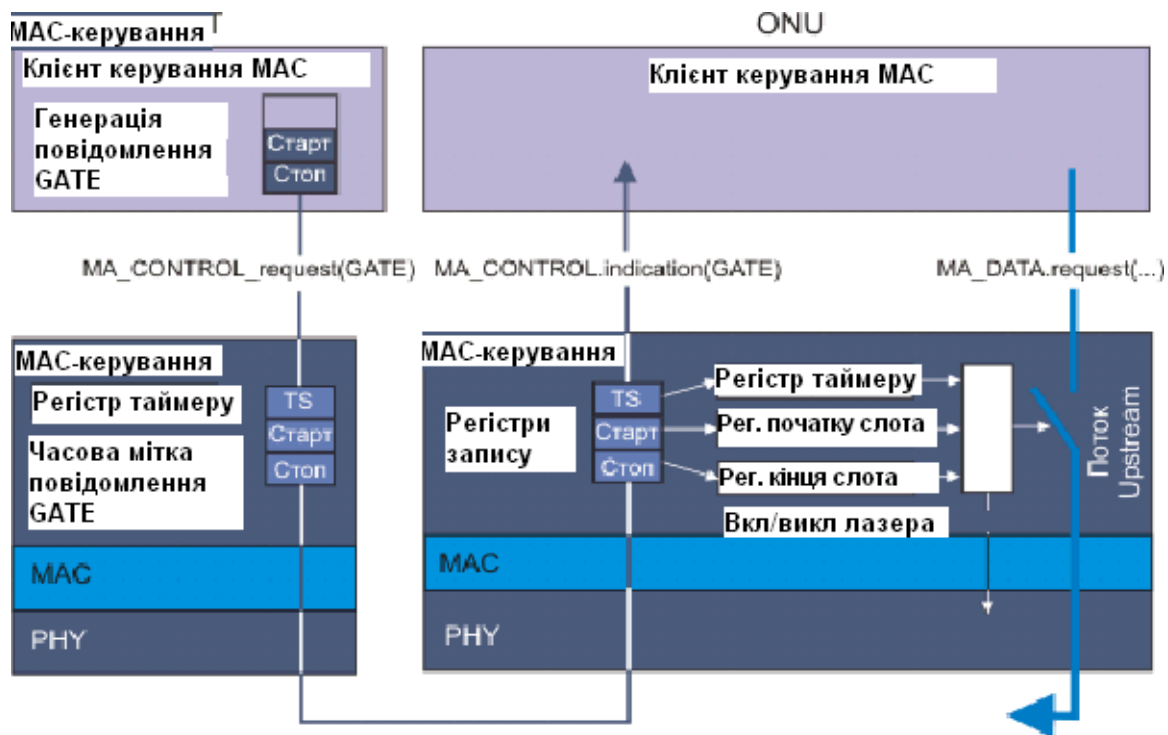


Рисунок 3.13 - Схемі відпрацювання повідомлення GATE

Коли в OLT надходить повідомлення REPORT з часовою міткою, воно передається на рівень MAC-управління, відповідального за виділення смуги пропускання. Крім того, OLT обчислює заново RTT для ONU, яке відправило повідомлення. Відхилення нового значення RTT від попереднього за встановлені межі свідчить про порушення синхронізації. У цьому випадку OLT блокує подальшу передачу до реініціалізації даного ONU.

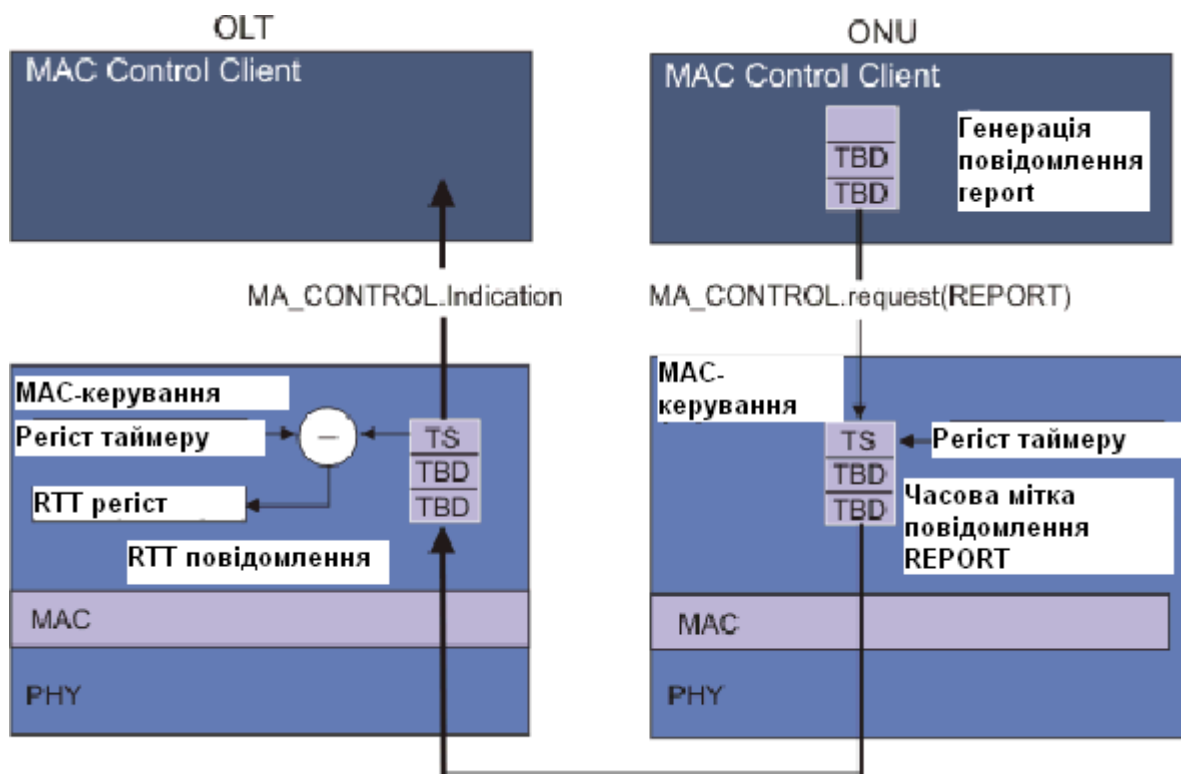


Рисунок 3.14 - Схемі відпрацювання повідомлення REPORT

OLT може виділити ONU до 4 тайм-слотів для передачі. Кадри, які надходять на ONU від кінцевих вузлів, оформлюються у вигляді черг. У разі, коли ONU має більше однієї заповненої черги, воно може самостійно вирішувати, як розподіляти ресурси між чергами. У повідомлення REPORT ONU може повідомляти OLT про стан до 8 черг. Для кожної черги може бути повідомлено (в повідомленнях Report) про декілька часових порогів, що дозволяє OLT виділити кількість тайм-слотів, базуючись на одному з цих порогів, уникаючи таким чином можливих простоїв каналу, коли буде

виділено більший часовий проміжок для передачі, ніж це потрібно. Число порогів, яке можуть бути передано в повідомленні REPORT, залежить від того, скільки черг декларується ONU. ONU, яке анонсує 8 черг, може мати до 2-х порогів на чергу. Якщо для ONU доступна тільки одна черга, воно може анонсуватися до 13 порогів.

Після реєстрації ONU, OLT виділяє для нього смугу пропускання у відповідності з налаштуваннями системи. Для PON ширина смуги пропускання означає кількість тайм-слотів, виділених для конкретного ONU. Кожен тайм-слот має довжину 16 нс. Кожен ONU синхронізований з портом OLT. Між смугами пропускання існує захисна смуга, що призначена для запобігання накладанню сигналів від різних ONU (рис. 3.15).

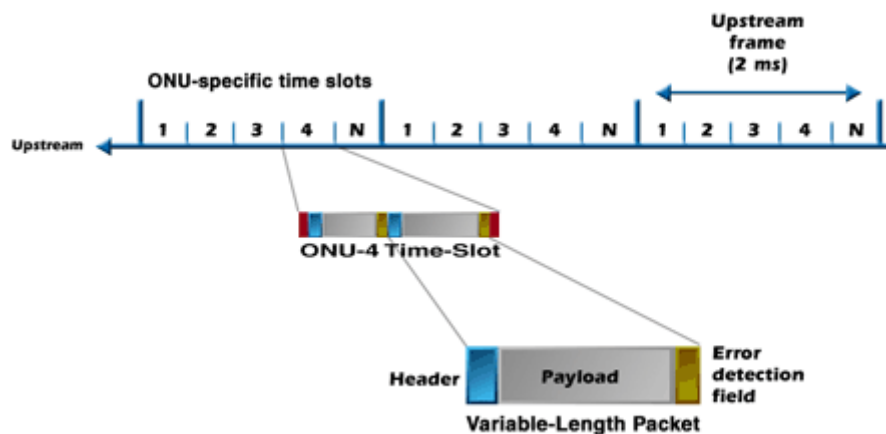


Рисунок 3.15 - Потік кадрів висхідного трафіку в GPON

TDM контролер кожного ONU за допомогою тактуючої інформації від OLT контролює тактування висхідної передачі кадрів. На рис. 3.15 зображено тайм-слот для ONU-4, який включає в себе два кадри змінної довжини та службову інформацію (захисна частотна смуга, тактующий індикатор та індикатор потужності сигналу). Коли ONU не передає інформацію, у відведений для нього тайм-слот передається «порожній» сигнал.

У висхідному напрямку ONU не може прямо отримати сигнал від іншого ONU. Зв'язок між ONU можливий тільки через OLT (група первинний/вторинний).

У низхідному напрямку використовуються такі методи захисту даних.

1. Автентифікація ONU перед наданням доступу.

Інформацією для автентифікації має бути унікальний ідентифікатор, наприклад МАК адреса ONU.

2. Визначення приналежності кадру до конкретного ONU, яке проходить на фізичному рівні моделі OSI.

При отриманні кадру даних ONU перевіряє ідентифікатор, який визначає належність кадру до конкретного ONU. «Чужі» кадри відкидаються і не передаються на верхні рівні. Ця функція реалізована апаратно і не підлягає змінам.

3. Між OLT та ONU можливе використання 128-bit AES шифрування. В цьому випадку ключ для кожного ONU буде унікальним.

4.5. Особливості технології 10 G-EPON (10 Gigabit Ethernet PON)

10G-EPON (10 Gigabit Ethernet PON) — технологія пасивних оптичних мереж доступу (PON), що є розвитком технології GEPON розглянутої вище і повністю сумісна з нею. Цю технологію було стандартизовано 11 вересня 2009 року документом IEEE 802.3av-2009. Доповнення до 10G-EPON регламентовано стандартом IEEE 802.3bk-2013, який було затверджено 23 серпня 2013 року [Д: 7].

Як і в інших технологіях пасивних оптичних мереж, в 10G-EPON:

- використовується деревоподібна топологія (Point To Multipoint, P2MP) волоконно-кабельної системи з пасивним оптичним розгалуженням на сплітерах;
- робота системи здійснюється по одному волокну за принципом WDM.

Технологія 10G-EPON дає можливість застосовувати одну головну станцію (Optical Line Terminal, OLT) на 64 абонентські пристрої (Optical Network Unit, ONU) на відстанях до 20 км.

Стандарт підтримує два типи конфігурації: *симетричну* (10/10G-EPON) й *асиметричну* (10/1G-EPON). У асиметричній конфігурації низхідний потік даних (від головної станції до абонентів) пересилається зі швидкістю 10 Гб/с, а висхідні потоки (від усіх абонентів до головної станції) передаються із загальною швидкістю 1 Гб/с. У симетричній конфігурації як низхідний, так і висхідний потоки мають швидкість 10 Гб/с.

Співіснування з GPON

Стандарт IEEE 802.3av багато уваги приділяє можливості безперешкодної одночасної роботи систем EPON зі швидкістю 1 Гб/с і 10 Гб/с в межах єдиної оптичної розподільчої мережі. У низхідному напрямі для передачі потоків 1 Гб/с і 10 Гб/с застосовуються хвилі різної довжини (рис. 3.16): передавання потоку 1 Гб/с обмежено діапазоном 1480–1500 нм, а передавання потоку 10 Гб/с обмежено діапазоном 1575–1580 нм. У висхідному напрямі діапазони хвиль для потоків 1 Гб/с і 10 Гб/с частково перетинаються: передавання потоку 1 Гб/с йде в діапазоні 1260–1360 нм, а передавання потоку 10 Гб/с – в діапазоні 1260–1280 нм. Це вимагає розподілення за часом в канал потоків 1 Гб/с і 10 Гб/с від різних ONU. Для вирішення цієї задачі використовується метод dual-rate TDMA.

Абонентські пристрої (ONU) можуть мати різні реалізації: вони можуть підтримувати лише швидкість 1 Гб/с в обох напрямках, швидкість 10 Гб/с у низхідному напрямі та швидкість 1 Гб/с у висхідному, чи швидкість 10 Гб/с в обох напрямках. Сумісність різних реалізацій абонентських пристроїв (ONU) з різними конфігураціями головної станції (OLT) наведено у таблиці 3.3.

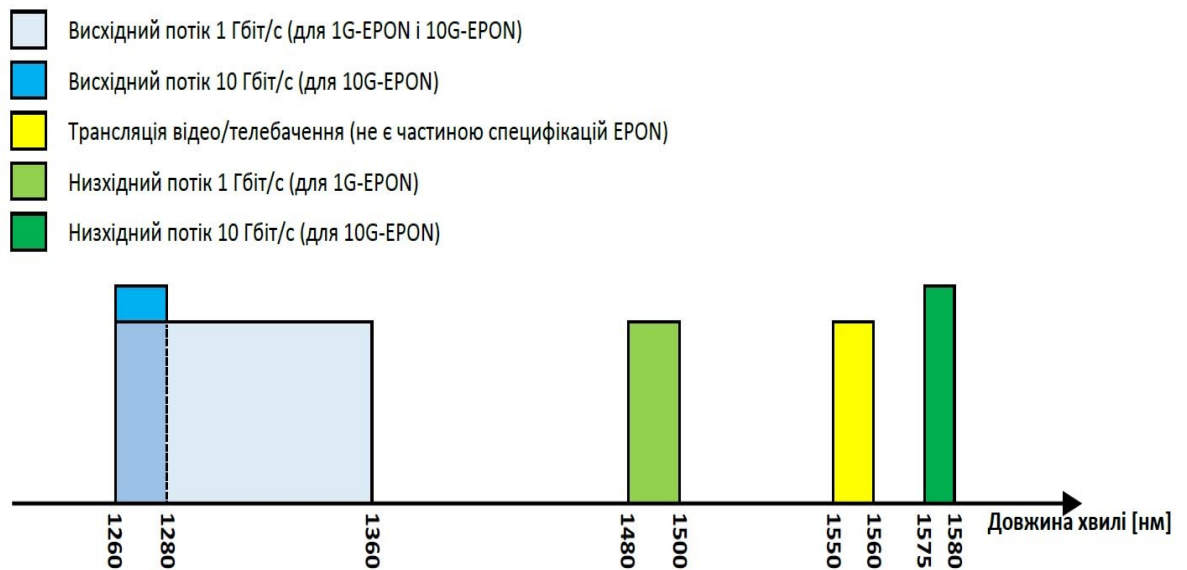


Рисунок 3.16 - Схема використання різних діапазонів хвиль у 10G-EPON

Таблиця 3.3 - Варіанти сумісності ONU і OLT

Реалізація OLT	Типи ONU, що підтримуються
Низхідний потік: два діапазони хвиль Висхідний потік: одна швидкість	(1) 1G-EPON ONU (2) 10/1G-EPON ONU
Низхідний потік: один діапазон хвиль Висхідний потік: дві швидкості	(1) 10/10G-EPON ONU (2) 10/1G-EPON ONU
Низхідний потік: два діапазони хвиль Висхідний потік: дві швидкості	(1) 1G-EPON ONU (2) 10/1G-EPON ONU (3) 10/10G-EPON ONU

4.6. Особливості побудови мереж PON

4.6.1. Загальна термінологія

Вікно прозорості - діапазон довжин хвиль оптичного випромінювання, в якому має місце менше, у порівнянні з іншими діапазонами, загасання випромінювання в волокні (для одномодового волокна це, зазвичай, 1310 нм,

1490 нм або 1550 нм).

дБм - децибел на міліват, одиниця виміру потужності в оптичних системах передачі даних. Відрізняється від децибел тим, що рівень еталонного сигналу завжди дорівнює 1мВт. Формула переводу потужності в дБм: $A = 10\log X$, де A - значення в дБм, \log - десятковий логарифм, X - значення потужності в мВт.

Оптична потужність - потужність передавача будь-якого оптичного пристрою прийому / передачі даних. Вимірюється в дБм або мВт. Стандартна потужність передавача в PON становить 4дБм (2.5мВт) для OLT і 2дБм (1.5мВт) для ONU (допустимі значення оптичної потужності знаходяться в діапазоні 2 ... 7дБм для OLT і 1 ... 4дБм для ONU).

Оптична чутливість - чутливість приймача будь-якого оптичного пристрою прийому / передачі даних. Вимірюється в дБм або мВт. Стандартна чутливість приймача в PON становить -30дБм або 0.001мВт для OLT і -26дБм або 0.025мВт для ONU.

Оптичний бюджет потужності - різниця між значенням потужності передавача і чутливості приймача на різних кінцях лінії зв'язку. Вимірюється в дБ. Стандартний оптичний бюджет PON класу 2 становить 25дБ гарантовано (допустимі значення оптичного бюджету потужності знаходяться в діапазоні 25 ... 30дБ).

Загасання - процес втрати потужності світлового сигналу в лінії зв'язку. Сигнал в лінії зв'язку загасає як природним чином, так і за рахунок неоднорідностей в волокні, спліттерах, механічних з'єднувачах, в місцях зварювання волокна, перегинів, механічних пошкоджень. Вимірюється загасання в дБ/км для волокна і в дБ для всього іншого. Стандартне загасання у волокні на довжині хвилі 1310нм становить 0.36дБ/км, на довжині хвилі 1550нм - 0.22дБ / км. Стандартне загасання на механічному з'єднувачі типу SC / UPC-SC / UPC становить близько 0.5дБ, на зварюванні - 0.05дБ. Основне загасання в PON-мережу вносять розгалужувачі (спліттери) - загасання на них може бути від 3дБ до 21,5 дБ (залежить від типу та кількості виходів розгалужувача).

Оптичний бюджет втрат - сумарне загасання від джерела сигналу до самого віддаленого приймача сигналу. Вимірюється в дБ.

4.6.2. Розрахунок швидкості передачі даних по мережі PON

Розрахунок будемо проводити виходячи з припущення, що до одного PON-порту OLT підключено максимально можлива кількість ONU (64 одиниці) [Д: 6]. Виходячи зі швидкості низхідного потоку 1000 Мб/с (нагадуємо, що бітова швидкість GPON становить 1250 Мб/с, але, з урахуванням схеми логічного кодування 8B/10B, швидкість передачі вихідної бітової послідовності становитиме 1000 Мб/с) при постійному використанні каналу усіма ONU на одне ONU приходиться до 16 Мб/с. Це найгірший випадок для кінцевого користувача. Звичайно, при зменшенні кількості активних ONU та інтенсивності їх передачі даних, швидкість на одне ONU буде збільшуватись до максимального значення 1000 Мб/с (з урахуванням типового середньостатистичного використання каналу одним ONU на рівні 25% усереднене значенні швидкості на одне ONU становитиме 64 Мб/с).

У висхідному каналі при рівномірному виділенні тайм-слотів усім ONU швидкість на одне ONU також буде змінюватись у діапазоні від 16 Мб/с до 1000 Мб/с.

4.6.3. Вибір розгалужувачів (спліттерів)

Топологія PON стандартно є деревовидною, однак, дерево може вироджуватися в шину або зірку - все залежить, в першу чергу, від фізичного розташування кінцевих абонентів. Виходячи з територіального розташування кінцевих абонентів і обираються розгалужувачі (спліттери).

Розгалужувачі бувають Х- і Y-образні, зварні (сплавні) і планарні [Д: 6]. Розрізняються вони технологією виготовлення і показниками загасання на кожному виході після розгалуження вхідного сигналу і кількістю входів. Х-образні розгалужувачі в PON використовуються для додавання у низхідний

потік телевізійного сигналу на окремій довжині хвилі (рис. 3.5) , Y-образні - для стандартної побудови дерева.

Зварні розгалужувачі виготовляються за технологією FBT (Fused Biconical Taper) [Д: 6]: два волокна з видаленими зовнішніми оболонками сплавляють в елемент з двома входами і двома виходами (2/2), після чого один вхід відрізають і закривають матеріалами, що не відбивають випромінювання, формуючи розгалужувачі 1/2 . При цьому потужність сигналу на кожному виході розгалужувача дорівнює якійсь відсоткової частки від потужності сигналу на вході в розгалужувач (зазвичай 50% / 50%). Можна забезпечити поділ потужності і в інших пропорціях, наприклад 20% / 80% (20% потужності сигналу йде в одне плече, 80% - в інше). Зварні розгалужувачі зазвичай мають від одного до трьох вікон прозорості (1310нм, 1490нм або 1550нм). Такі розгалужувачі найчастіше використовуються для побудови мереж кабельного телебачення [Д: 6].

Планарні розгалужувачі PLC (Planar Lightwave Circuit) виготовляються в кілька етапів [Д: 6]. Перший з них полягає в нанесенні на деяку підкладку відбиваючого шару-оболонки. На даний шар наноситься матеріал хвилеводу (оксид кремнію), на якому потім формується маска для травлення. Результатом процесу травлення є система хвилеводів, що є, по суті, оптичним розгалужувачем. Система планарних хвилеводів покривається другим шаром-оболонкою. До вже готових планарних хвилеводів приварюються пігтейли (відрізок волокна з встановленим на один кінець оптичним з'єднувачом), після чого пристрій поміщається в корпус з пластика або металу. Необхідна кількість розгалужень PLC-спліттера досягається поєднанням розгалужувачів 1×2 . Планарна технологія дозволяє виготовляти компактні і надійні розгалужувачі з числом вихідних волокон до 64. Планарні розгалужувачі мають стабільніші і точніші характеристиками на виходах, працюють в широкосмуговому діапазоні хвиль 1260нм ... 1650нм і мають менше загасання на порт (у порівнянні зі зварними при розгалуженні більш ніж на 2). Планарні розгалужувачі зазвичай мають однакові значенні загасання на кожне розгалуження і розгалужують

вхідний сигнал на 2N виходи (наприклад, 1x2, 1x4 ... 1x64). Також існують планарні розгалужувачі з двома входами і 2N виходами (використовуються для введення в волокно сигналу від OLT та телевізійного сигналу) [Д: 6].

Усереднені значення загасань для зварних та планарних розгалужувачів наведені у табл. 3.4 та 3.5 [Д: 6].

Таблиця 3.4 – Усереднені значення загасань зварних розгалужувачів (без врахування загасання на оптичних з'єднувачах)

Розгалужувач X/Y*	Загасання X, dB	Загасання Y, dB
FBT 5/95	13,7	0,32
FBT 10/90	10,08	0,49
FBT 15/85	8,16	0,76
FBT 20/80	7,11	1,06
FBT 25/75	6,29	1,42
FBT 30/70	5,39	1,56
FBT 35/65	4,56	1,93
FBT 40/60	4,01	2,34
FBT 45/55	3,73	2,71
FBT 50/50	3,17	3,19

* - відсоток потужності сигналу на одному та другому виходах розгалужувача

Таблиця 3.5 – Усереднені значення загасань планарних розгалужувачів (без врахування загасання на оптичних з'єднувачах)

Розгалужувач 1xN	Загасання на кожному виході, dB
PLC 1x8	10,7
PLC 1x4	7,4
PLC 1x2	4,3
PLC 1x16	13,9
PLC 1x32	17,2
PLC 1x64	21,5

4.6.4. Типові топології PON

PON може бути побудована з використанням трьох основних топологій («дерево», «зірка», «шина») і їх комбінацій [Д: 6]. При проектуванні таких мереж необхідно провести розрахунки бюджету втрат при використанні певної топології і зіставити ці розрахунки з оптичним бюджетом PON-системи.

При подальшому розгляді топологій для проведення оцінки бюджету втрат будемо використовувати такі вихідні дані [Д: 6].

- Активне обладнання (OLT і ONU) з оптичним бюджетом системи 30 дБ (обладнання фірми BDCOM) - вихідна потужність оптичного модуля SFP на порту OLT: “SFP TX PWR” = +4 дБм, чутливість приймача ONU: “ONU RX SENS” = -26 дБм.
- Втрати на механічному з'єднанні типу SC/UPC-SC/UPC = 0,5 дБ.
- Втрати на зварці = 0,05 дБ.
- Загасання в стандартному волокні G.652.D на кілометр на довжині хвилі 1310 = 0,36 дБ/км.
- Загасання в стандартному волокні G.652.D на кілометр на довжині хвилі 1550 = 0,22 дБ/км.

«Зірка»

У класичному вигляді в PON будь-якої топології використовується одне волокно на 64 абонента (якщо використовується обладнання BDCOM; для інших виробників цифри можуть відрізнятися). Тобто один PON-порт OLT обслуговує до 64 ONU. Якщо всі ці ONU знаходяться в радіусі 200-300 метрів від якоїсь центральної точки, де є можливість встановити бокс з розгалужувачем, можна будувати «зірку» [Д: 6].

Найпростіша «зірка» - це розподіл одного волокна на 64 напрямки. Для побудови такої «зірки» потрібно, в першу чергу, вибрати точку, по можливості рівновіддалену від усіх потенційних абонентів. У цій точці буде встановлено планарний розгалужувач 1x64. До розгалужувача з боку OLT

необхідно підвести кабель якомога меншою ємності (1 або 2 волокна). Кабель більшої ємності закладати немає сенсу, так як ділянка 1х64 навіть при самій щільній забудові покриє велику площу житлового масиву і забезпечить підключення до 64-х абонентів (а це рівно четверта частина абонентської ємності OLT).

Радіус, який зможе покрити така «зірка» розраховується наступним чином.

- Кількість механічних з'єднань SC/UPC-SC/UPC – 2 (1 з'єднання на порту оптичної розподільної панелі (ODF) зі сторони OLT, 1 з'єднання на виході розгалужувача в бік ONU).
- Втрати на розгалужувачі 1х64 з урахуванням механічних з'єднань:
 $21.5 + 2 \times 0.5 = 22.5$ дБ.
- Різниця між втратами на розгалужувачі 1х64 і оптичним бюджетом системи: $30 - 22.5 = 7.5$ дБ.
- Стандартний запас оптичного бюджету (для урахування втрат на зварках волокна, втрат, пов'язаних з механічними навантаженнями на кабель, перегинами кабелю і т. і.; вибирається у діапазоні від 0 до 3 дБ): 3 дБ.
- Залишковий оптичний бюджет: $7.5 - 3 = 4.5$ дБ.
- Сумарна довжина ОВ, яке «вписується» в залишковий оптичний бюджет (при загасання 0,36дБ / км на довжині хвилі 1310nm): $4.5 / 0.36 = 12.5$ км.

В результаті, навіть якщо OLT знаходиться на відстані 5 км від розгалужувача, в радіус дії цього розгалужувача потрапляють 64 можливі абоненти на відстані до 7,5 км.

Існує два варіанти побудови мережі за топологією «зірка»: з використанням розгалужувача 1х64 і з використанням групи розгалужувачів 1х32 + 1х2 (рис. 3.17) [Д: 6]. Варіант з використанням групи розгалужувачів менш поширений. Для побудови такої «зірки» необхідно задіяти 2 оптичних волокна і три розгалужувача: два 1х32 і один 1х2. Розгалужувач 1х2 встановлюється відразу після модуля SFP OLT. Виходи розгалужувача 1х2 з'єднуються з двома волокнами кабелю, який прокладається в сторону

абонентів. Бюджет втрат такого варіанту: $4,3 + 17,2 + 3 \times 0,5 = 23$ дБ. При оптичному бюджеті системи 30 дБ, радіус такої мережі може досягати 11 км.

«Дерево»

Топологія типу «дерево» передбачає наявність «кореню», «гілок» і «листя». «Коренем» в GPON є PON порт OLT, «листям» виступають ONU, а у якості «гілок» можна розглядати оптичні кабелі, прокладені на всьому шляху від OLT до ONU [Д: 6]. Таким чином, на базі одного OLT з 4-ма портами можливо побудувати 4 дерева ємністю 64 абонента кожне.

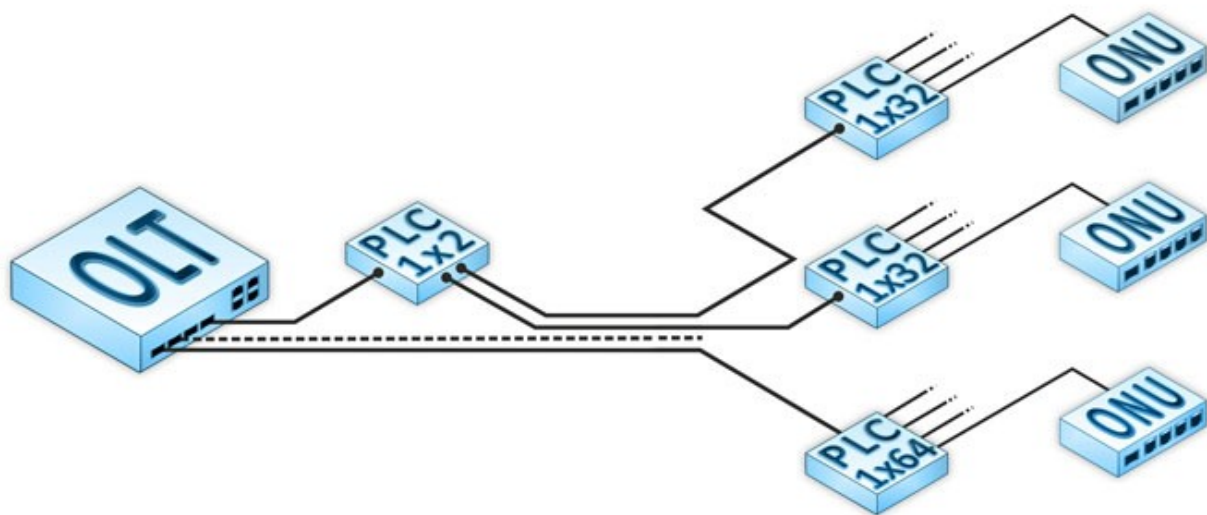


Рисунок 3.17 - Варіанти побудови мережі за топологією «зірка»

Концепція PON-дерева передбачає, що пасивна мережа може бути побудована на базі комбінації будь-яких розгалужувачів з урахуванням дотримання основного правила: кожне дерево не можна ділити більше, ніж на 64 абонента з дотриманням оптичного бюджету системи 30дБ. Топологію «дерево» можна умовно поділити на два типи: «одиначне дерево» (рис. 3.18) і «мультидерево» (рис. 3.19) [Д: 6]. Перший тип топології передбачає використання окремого оптичного кабелю на кожен напрямок і каскадне підключення розгалужувачів (зазвичай, розгалужувачі 1x8 або комбінація

розгалужувачів 1x2 та 1x4). У другому варіанті використовується загальний магістральний кабель (4, 8, 12 волокон) до першого розгалужувача на 4-ри входи. Далі можуть бути використані будь-які розгалужувачі: 1x2 зварні з відсотковим співвідношенням потужності вихідних сигналів, планарні 1x2, 1x4, 1x8, 1x16 з однаковими показниками загасань на кожному виході. Основними перевагами топології «мультидерево» є більш економне використання магістральних оптичних кабелів та простота підключення нових абонентів. В обох варіантах топології загальна кількість абонентів може досягати 256 (OLT з 4-ма портами, 64 ONU на порт).

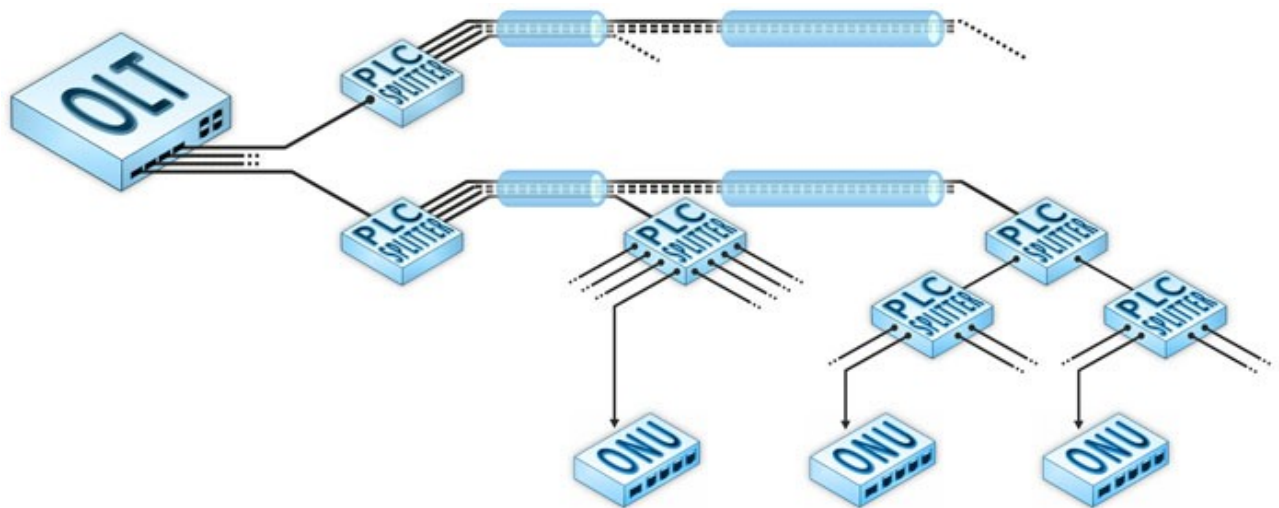


Рисунок 3.18 - Топологія PON «одиначне дерево»

Використовуючи перший тип топології, можна забезпечувати зв'язком невеликі локальні райони (до 4-х незалежних районів на один OLT), а використовуючи другий тип можна побудувати потужну і дуже ємну інфраструктуру в цілому населеному пункті, використовуючи групу OLT на стороні провайдера і одне магістральний дерево [Д: 6].

Основним завданням інженера-проектувальника при побудові топології майбутньої мережі є вибір місця розташування вузлів розгалуження. Це пов'язано з тим, що до останнього (абонентського) вузла розгалуження

«стовбур» і «гілки» «дерева» складаються з оптичного кабелю з числом волокон, кратним чотирьом. При використанні топології «мультидерево» мережа повинна покрити всю площу передбачуваного району підключення, а листя, як і у всіх інших випадках, відводяться під абонентські підключення. Проектувати таку пасивну мережу зручно, розбиваючи житловий масив на квадрати (квадратно-гніздовий спосіб) і встановлюючи в центрі кожного квадрату розгалужувач 1xM, який забезпечує передачу сигналу на M напрямків всередині цього квадрата (рис. 3.19) [Д: 6].

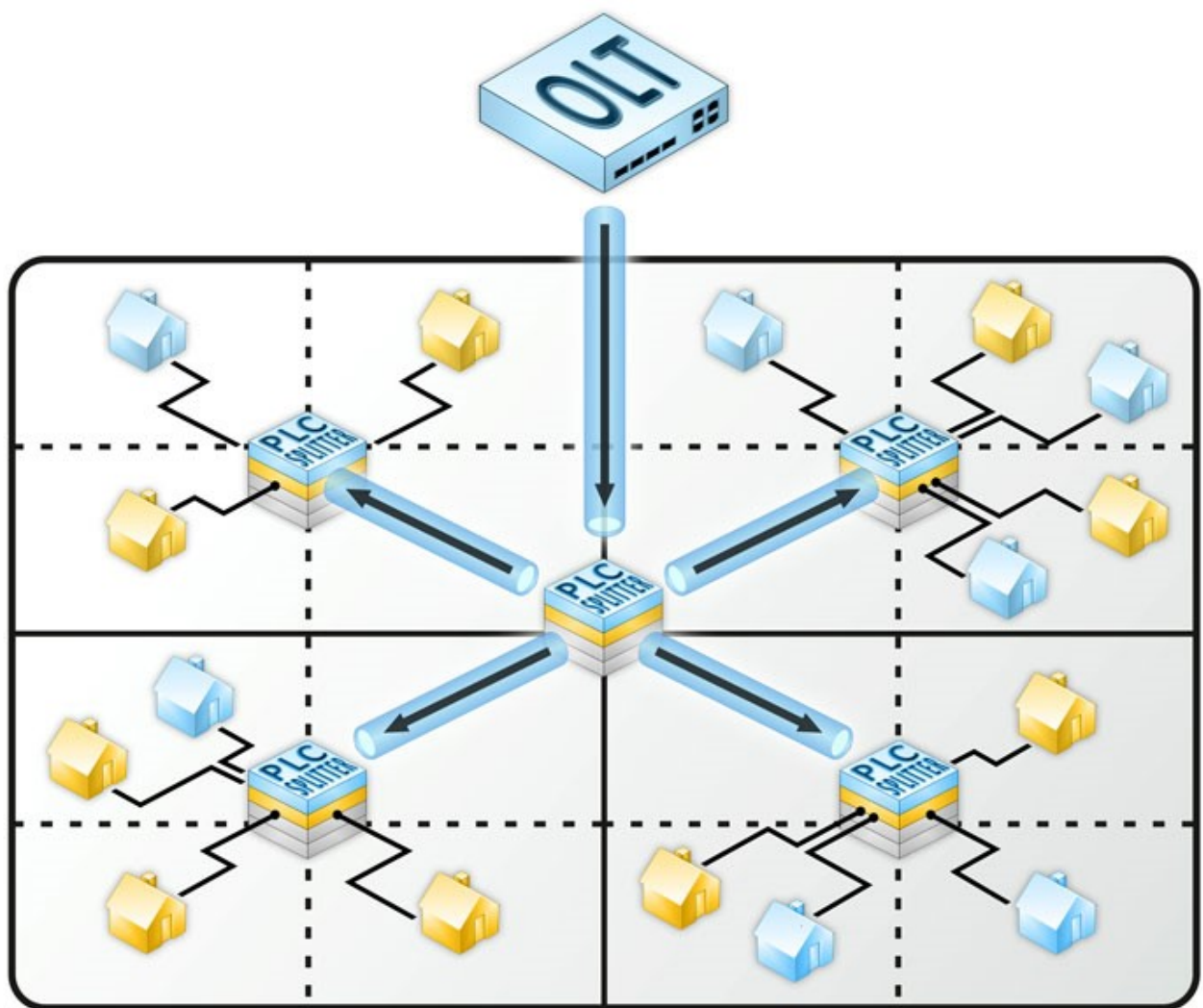


Рисунок 3.19 - Топологія PON «мультидерево», побудована квадратно-гніздовий способом з використанням розгалужувачів 1x4

Після того, як визначені основні вузли розгалуження і прокладений кабель, починається покрокове розвиток «мультидерева». У кореновому N-

волоконному кабелі, що йде від вузла провайдера до абонентських вузлів розгалуження, використовується перше волокно. У всіх вузлах розгалуження це волокно з'єднується необхідними розгалужувачами, а інші волокна залишаються непідключеними (рис. 3.20) [Д: 6]. Таким чином, стає активним перше з N дерев в «мультидереві».

Як тільки будь-який з абонентських розгалужувачів (до якого безпосередньо підключаються ONU) на певному напрямку повністю заповнюється абонентами (будуть заняті усі виходи розгалужувача), в цьому ж напрямку починає розвиватися друге з N дерев - і так до тих пір, поки всі волокна на всіх напрямках не будуть задіяні.

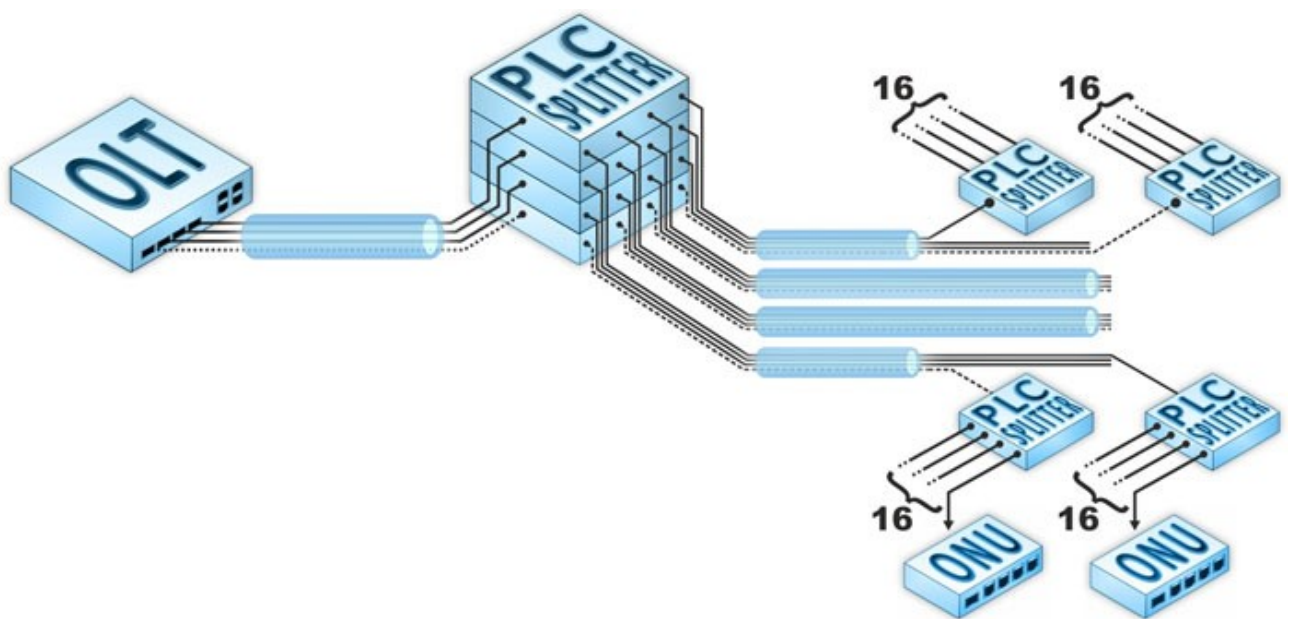


Рисунок 3.20 - Основний вузол розгалуження в топології PON «мультидереві»

І в першому і в другому варіантах топологій можуть використовуватися будь-які розгалужувачі 1xN. Найбільш поширені комбінації розгалужувачів наведені на рис. 3.21 [Д: 6]. Проектуючи такі мережі необхідно дотримуватись двох правил:

- 1) «правило тридцяти децибел»: оптичний бюджет втрат не повинен перевищити 30дБ;
- 2) «правило розгалуження на 64»: жодне волокно, що виходить з PON-порту OLT, не повинно бути розгалужено більше 64-х разів і до нього не повинно бути підключено більше 64-х ONU.

PLC 1x8 + PLC 1x8.

Для повного завантаження одного порту OLT (64 абоненти) потрібно 9 таких розгалужувачів: один кореневий + вісім абонентських (рис. 3.21). Для повного завантаження OLT на 256 абонентів, побудованого за принципом «1x8 + 1x8», необхідно 36 таких розгалужувачів. Залишковий оптичний бюджет (приблизно, 4 дБ) здатний забезпечити глибину дерева до 11 км (без урахування зварок, перегинів і т. і.).

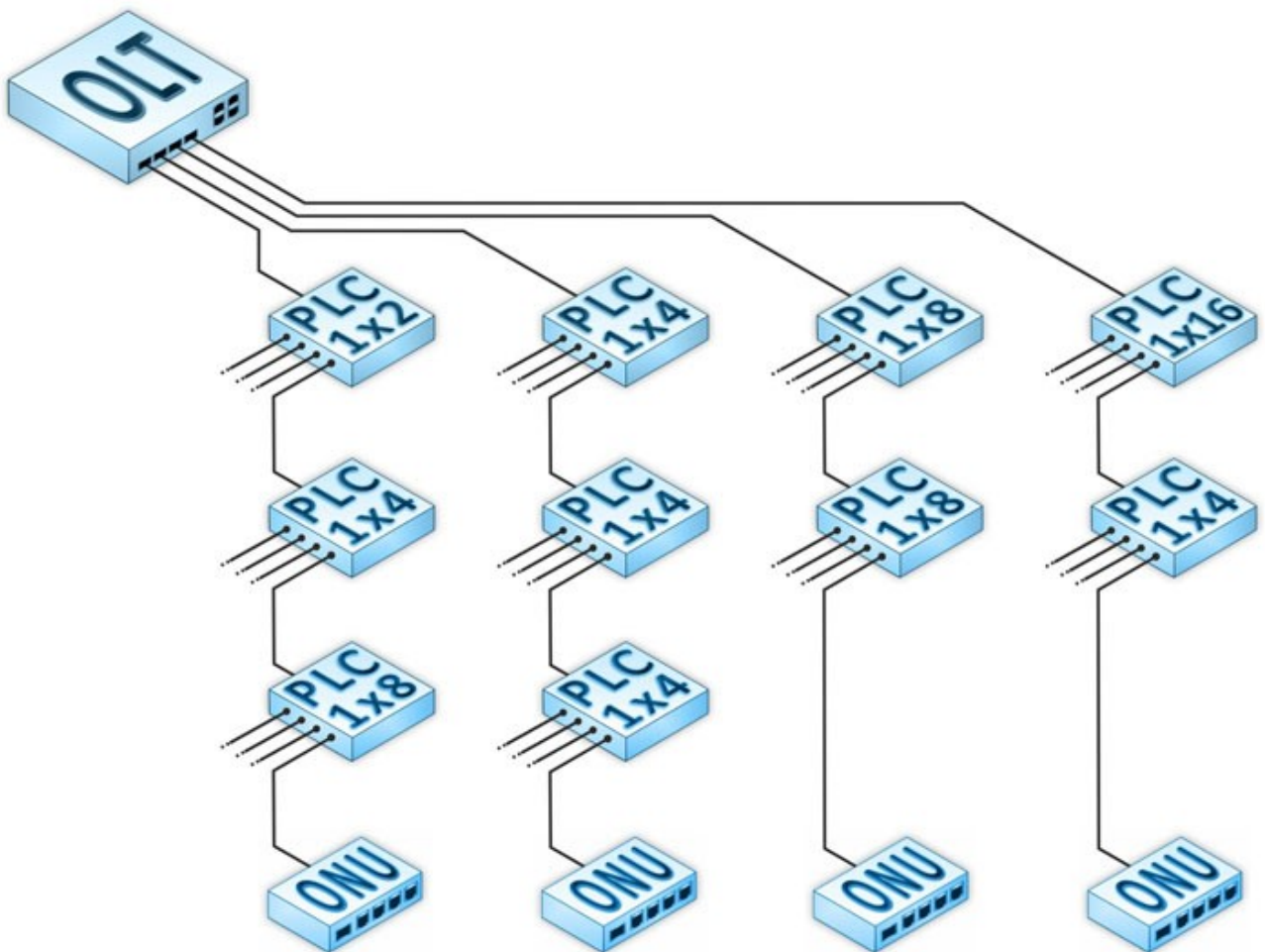


Рисунок 3.21 - Основні варіанти розгалуження

PLC 1x4 + PLC 1x4 + PLC 1x4.

Такий варіант розгалуження дуже поширений за рахунок своєї відносної простоти і зручності побудови. Для повного завантаження OLT необхідно 84 планарних розгалужувачів 1x4. Залишковий оптичний бюджет (приблизно, 3 дБ) здатний забезпечити глибину дерева до 8 км (без урахування зварок, перегинів і т. і.).

PLC 1x4 + PLC 1x16.

Досить зручний варіант для житлових масивів, в яких абоненти розташовані досить близько один від одного. Набір розгалужувачів 1x4 і 1x16 можна використовувати двома способами: або спочатку використати розгалуження 1x4, а потім 1x16, або навпаки. Кількість розгалужувачів для першого випадку: 4 штуки 1x4 + 16 штук 1x16. Для другого випадку: 4 штуки 1x16 + 48 штук 1x4 (для повного завантаження OLT на 256 абонентів). Такі варіанти розгалуження мають досить високий залишковий оптичний бюджет (приблизно, 4,2 дБ) і здатні забезпечити глибину дерева до 12 км (без урахування зварок, перегинів і т. і.).

PLC 1x2 + PLC1x4 + PLC1x8.

Найбільш масштабований варіант розгалуження. 6 можливих комбінацій розгалужувачів роблять цей варіант розгалуження практично універсальним засобом для побудови PON:

- 1x2 + 1x4 + 1x8,
- 1x2 + 1x8 + 1x4,
- 1x4 + 1x2 + 1x8,
- 1x4 + 1x8 + 1x2,
- 1x8 + 1x2 + 1x4,
- 1x8 + 1x4 + 1x2.

Як і у попередньому варіанті розгалуження залишковий оптичний бюджет для всіх комбінацій однаковий (приблизно, 2,6 дБ) і здатний забезпечити глибину дерева до 7,5 км (без урахування зварок, перегинів і т. і.).

«Шина».

«Шина» в PON розгортається на одному волокні з використанням каскаду зварних розгалужувачів 1x2 з відсотковим співвідношенням потужності вихідних сигналів (рис. 3.22) [Д: 6]. При цьому, вхід першого розгалужувач підключається до PON-порту OLT, а далі каскад будується за принципом «більша потужність - в лінію», тобто, більша потужність вихідного сигналу надходить в магістральну лінію для подальшого каскадування на розгалужувачах, а менша вихідна потужність відводиться для підключення абонентів шляхом підключення до зварних розгалужувачів 1x2 з відсотковим співвідношенням потужності вихідних сигналів планарних розгалужувач 1x2, 1x4 і 1x8.

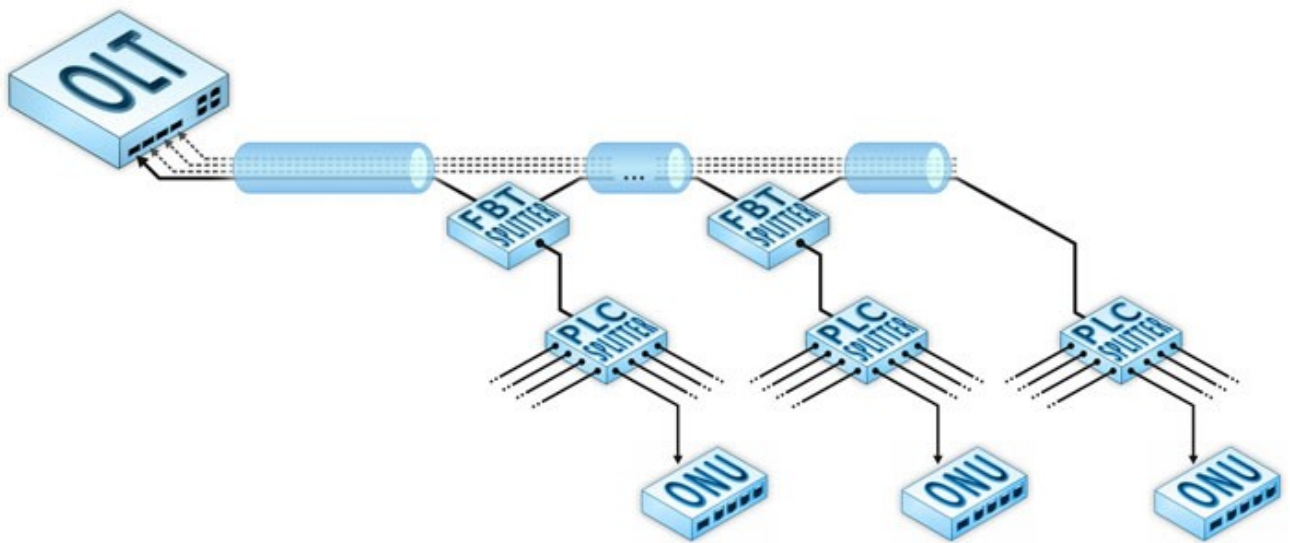


Рисунок 3.22 - Топологія PON «шина»

Така топологія найбільше підходить для населених пунктів, що представляють собою одну або кілька довгих вулиць, які йдуть паралельно. При правильному плануванні мережа є легко масштабованою і підключення нового абонента проводиться «в три кроки»: прокладка патч-корду зовнішнього виконання від планарного розгалужувача до абонента, підключення патч-корду до розгалужувача, підключення патч-корду до абонентського ONU.

Розрахунки і практика показали, що найбільша ефективність топології типу «шина» досягається при комбінуванні зварних розгалужувачів 1x2 і планарних розгалужувачів 1x4 і 1x8. Для досягнення однакового стабільного сигналу на всіх ONU, в каскаді повинні бути встановлені зварні розгалужувачі 5/95, 10/90, 20 /80, 30/70, 40/60 і 50/ 50. Сумарне загасання на розгалужувачах в такому каскаді складає 9 дБ (дивись табл. 1) без урахування механічних та зварних з'єднань. Загасання на першому зварному розгалужувачі в сторону абонентів складає 13,7 дБ і до нього можна підключити планарний розгалужувач 1x8 без перевищення бюджету потужності. При необхідності підключення більше 8 абонентів у якості першого зварного розгалужувача необхідно використати розгалужувач 10/90.

4.6.5. Типи оптичних з'єднувачів

Існує два методи фізичного з'єднання оптичних волокон: використання сполучних з'єднувачів (типу SC / APC або SC / UPC) між абонентським волокном і виходом розгалужувача або волокном і портом OLT/ ONU; використання зварювання двох волокон – абонентського волокна і вихідного волокна розгалужувача (транспортне волокно і вхідне волокно розгалужувача завжди зварюються безпосередньо) [Д: 6].

SC/UPC (Subscriber (Square / Standard) Connector/UltraPolishedConnector) – стандартний квадратний з'єднувач синього кольору для одномодового волокна (або сірого - для багатомодового).

SC/APC (Subscriber (Square / Standard) Connector/AnglePolishedConnector) – стандартний квадратний з'єднувач зеленого кольору для одномодового волокна.

Крім кольору, з'єднувачі розрізняються ферулою - керамічним (рідше пластиковим) сердечником, який у UPC відполірований під кутом 90 ° до поздовжньої осі ферули, а у APC - скошений під кутом 8 °. APC призначений для того, щоб зменшити вплив відбитого сигналу на сигнал в волокні (рис. 3.23).

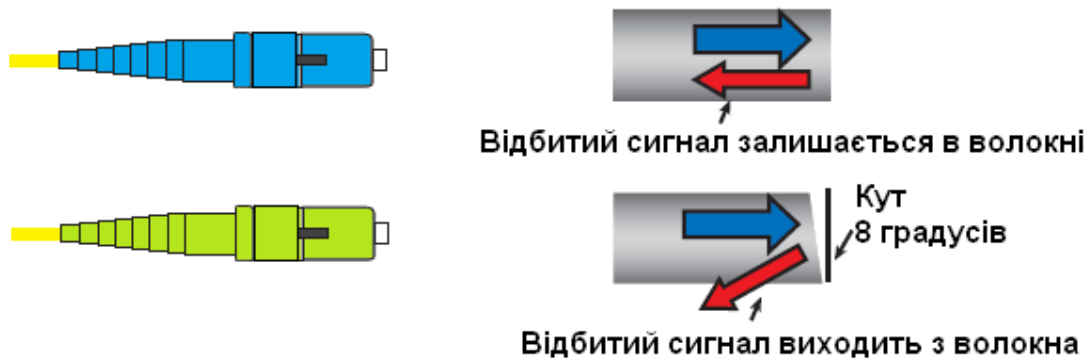


Рисунок 3.23 - Відмінності SC/UPC і SC/APC конекторів

Під кожен вид з'єднувачів є і свої адаптери (UPC та, відповідно, APC). UPC і APC з'єднувачі між собою з'єднувати не можна. Пов'язано це знову ж з тими самими ферулами, в яких, власне, і відмінність. Їх можна пошкодити (рис. 3.24) і/або отримати на цьому з'єднанні велике загасання (близько 6дБ).

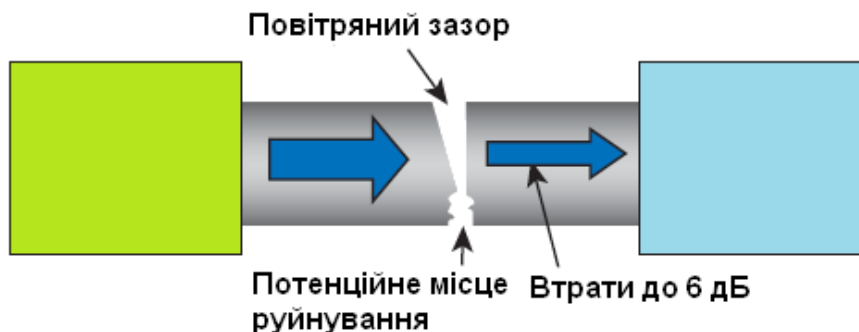


Рисунок 3.24 - Проблеми при з'єднанні SC/UPC і SC/APC з'єднувачів

З'єднувачі типу APC слід використовувати в тому випадку, якщо в дереві PON планується використання CATV, в іншому випадку можна використовувати стандартні UPC з'єднувачі.

5. ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДРотовИХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ (WI-FI) СТАНДАРТИВ IEEE 802.11X

Найбільш поширеним набором стандартів бездротових мереж є набір IEEE 802.11 (відомий також під назвою Wi-Fi). Технології з цього набору стандартів призначені для організації бездротових мереж передачі даних (Wireless LAN) на обмеженій території з рівноправним доступом абонентів до загального каналу передачі [О: 2,3,4,6, Д:5].

Комітет зі стандартів IEEE 802 сформував робочу групу по стандартам для бездротових локальних мереж IEEE 802.11 в 1990 році. Ця група зайнялася розробкою загального стандарту для радіообладнання і мереж, що працюють на частоті 2,4 ГГц із швидкостями доступу 1 і 2 Мб/с. У червні 1997 року була ратифікована перша специфікація IEEE 802.11.

У вересні 1999 року IEEE ратифікував розширення першої версії стандарту, що отримало назву IEEE 802.11b (також відоме, як IEEE 802.11 High rate). У 1999 році паралельно із стандартом IEEE 802.11b був створений ще один конкуруючий стандарт IEEE 802.11a. Два цих різновиди стандарту IEEE 802.11 є несумісними один з одним. Документом IEEE Std. 802.11b – 1999 передбачені робота в частотному діапазоні 2,4 ГГц і використання методу прямого розширення спектру (DSSS). Максимальна швидкість передачі, що закріплена в стандарті, складає 11 Мб/с (реальна пропускна здатність становить 6–7 Мб/с). Стандарт IEEE 802.11a передбачає перехід в діапазон 5 ГГц, а замість технології розширення спектру в ній застосовується метод кодованого ортогонального частотного мультиплексування (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing, COFDM), що розділяє одну високочастотну несучу на декілька піднесучих. Максимальна швидкість передачі (теоретично) може сягати 54 Мб/с.

У березні 2000 року в складі IEEE була сформована робоча група «g», учасники якої сконцентрували свої зусилля на розширенні специфікацій фізичного рівня стандарту IEEE 802.11b. Їх головною метою стало збільшення

максимальної пропускної здатності мереж IEEE 802.11b при збереженні ключових характеристик 802.11b, використанні частотного діапазону 2,4 ГГц і забезпеченні зворотної сумісності з мережами IEEE 802.11 на рівні протоколу доступу до середовища передачі (MAC).

Як і всі стандарти IEEE 802, 802.11 функціонує на двох нижніх рівнях моделі ISO/OSI: фізичному і каналному.

Основна архітектура, особливості та служби IEEE 802.11b/g визначаються в первинному стандарті IEEE 802.11. Специфікації IEEE 802.11b/g охоплюють тільки фізичний рівень, додаючи лише вищі швидкості доступу. Стандарти 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, 802.11ad належать до фізичного рівня середовища передачі; 802.11d, 802.11e, і 802.11h – до вище розташованого MAC-рівня; 802.11c, 802.11f, 802.11i – до більш високих рівнів моделі OSI.

З усіх існуючих стандартів бездротової передачі даних IEEE 802.11, на практиці найбільш часто використовуються лише чотири: 802.11b, 802.11g, 802.11n та 802.11ac. Базові характеристики стандартів фізичного рівня 802.11x наведені у табл. 5.1

Таблиця 5.1 – Базові характеристики стандартів 802.11.x

Стандарт	Частотний діапазон (МГц)	Методи модуляції	Ширина смуги каналу (МГц)	Швидкість передачі
IEEE 802.11	2400 – 2483.5	DSSS, FHSS	20	2 Мб/с
IEEE 802.11a	5150 – 5350 5670 – 5850	OFDM	20	54 Мб/с
IEEE 802.11b	2400.8 – 2483.5	DSSS	20	11 Мб/с
IEEE 802.11g	2400.8 – 2483.5	DSSS, OFDM	20	54 Мб/с
IEEE 802.11n	2400.8 – 2483.5 5150 – 5350	OFDM	20, 40	600 Мб/с
IEEE 802.11ac	5	SC, OFDM	40, 80, 160	6.93 Гб/с
IEEE 802.11ad	60	OFDM	2160	6.76 Гб/с

5.1. Режими роботи 802.11

IEEE 802.11 визначає два типи обладнання. Це – клієнт, який зазвичай є комп'ютером, укомплектованим бездротовою мережною інтерфейсною картою, і точка доступу (Access point – AP), яка виконує роль мосту між бездротовою і дротовою мережами. Точка доступу зазвичай містить в собі прийомопередавач, інтерфейс дротової мережі (IEEE 802.3), а також програмне забезпечення, що займається обробкою даних

Стандарт IEEE 802.11 визначає два режими роботи мережі – режим «Ad-hoc» (або тимчасовий режим) і клієнт/сервер (або режим інфраструктури – infrastructure mode) (рис. 5.1, 5.2) [О: 2,3,4,6, Д:5]. У режимі клієнт/сервер бездротова мережа складається, як мінімум, з однієї точки доступу, підключеної до дротової мережі, і деякого набору бездротових кінцевих станцій. Така конфігурація носить назву базового набору служб (Basic Service Set, BSS). Два або більше BSS, що створюють єдину підмережу, формують розширений набір служб (Extended Service Set, ESS). Оскільки більшості бездротових станцій потрібно отримувати доступ до файлових серверів, принтерів, Інтернет, що доступні в дротовій локальній мережі, вони працюватимуть в режимі клієнт/сервер.

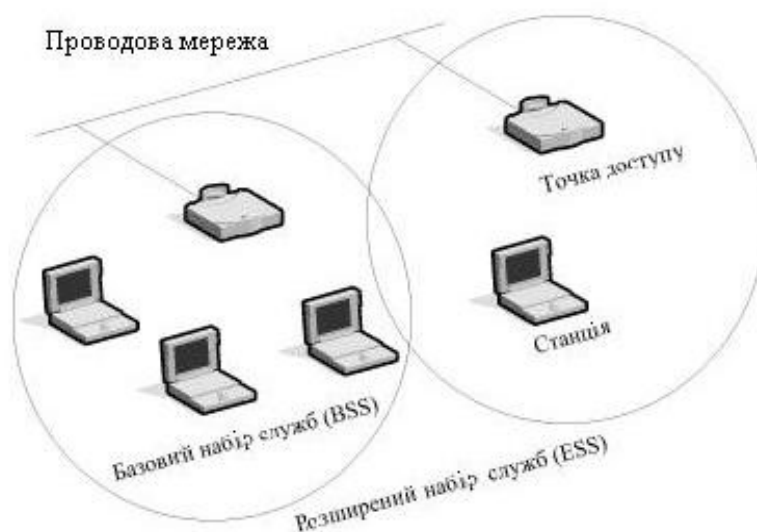


Рисунок 5.1 - Архітектура мережі «клієнт/сервер»

Режим «Ad-hoc» (інша назва точка-точка або незалежний базовий набір служб – IBSS) – це проста мережа, в якій зв'язок між численними станціями встановлюється безпосередньо, без використання спеціальної точки доступу.

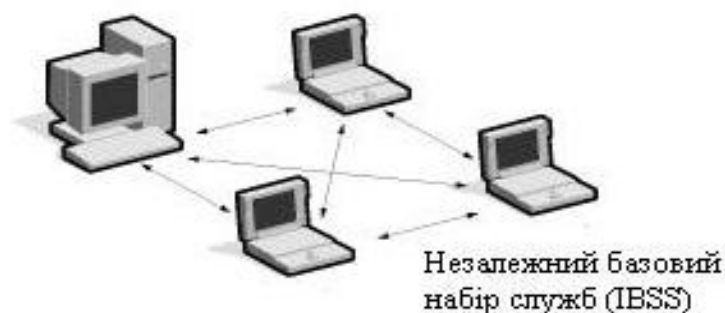


Рисунок 5.2 - Архітектура мережі «Ad-hoc»

5.2. Фізичний рівень IEEE 802.11

На фізичному рівні визначені два широкосмугових радіочастотних методи передачі і один – в інфрачервоному діапазоні. Радіочастотні методи працюють в діапазоні 2,4 ГГц і зазвичай використовують смугу 83 МГц - від 2,400 ГГц до 2,483 ГГц. Технології широкосмугового сигналу, що використовуються в радіочастотних методах, збільшують надійність, пропускну здатність, дозволяють багатьом непов'язаним один з одним пристроям розділяти одну смугу частот з мінімальними перешкодами один для одного.

Стандарт IEEE 802.11 використовує метод прямої послідовності (DSSS) і метод частотних стрибків (FHSS) [О: 2,3,4,6, Д:5]. Ці методи кардинально відрізняються і несумісні один з одним.

Передача з розширенням спектру методом перескоку частоти (FHSS)

FHSS – це метод розширення спектру, що дозволяє багатьом передавачам працювати в одній смузі радіоспектру, не заважаючи один одному, чому сприяють різні послідовності перескоків частоти [О: 2,3,4,6]. Стандарт визначає 79 каналів перескоку для Північної Америки та Європи і 23 – для Японії (кожен

з шириною смуги 1 МГц в діапазоні 2,4 ГГц – 2,483 ГГц). Порядок чергування каналів визначається псевдовипадковою послідовністю. Інші параметри передачі, такі як потужність передавачів, встановлюються кожною країною окремо. У Європі потужність EIRP (equivalent isotropically radiated power – еквівалентна ізотропно-випромінювана потужність) передавача обмежена 100 мВт.

Для модуляції сигналу стандарт визначає Гаусову частотну модуляцію (GFSK). Для швидкості 1 Мб/с стандарт задає використання дворівневої GFSK (тобто один біт відображається в одну частоту). Для швидкості 2 Мб/с стандарт задає використання чотирьохрівневої GFSK (тобто два біта відображається в одну частоту). Швидкість передачі 1 Мб/с є обов'язковою, а 2 Мб/с – можливою, для дорожчих пристроїв з розширеними можливостями.

Формат кадру фізичного рівня IEEE 802.11 при використанні схеми FHSS наведено на рис. 5.3.

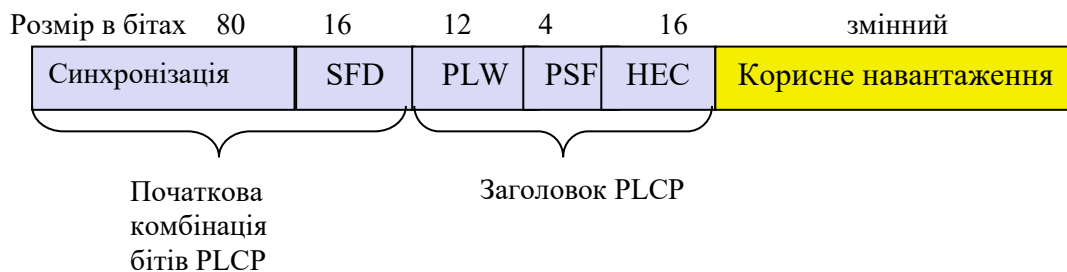


Рисунок 5.3 - Формат кадру при використанні схеми FHSS

Кадр фізичного рівня для методу FHSS складається з двох основних частин [О: 2,3,4,6]:

- 1) PLCP (Physical Layer Convergence Protocol – конвергентний протокол фізичного рівня) – початкова послідовність бітів і заголовок;
- 2) корисного навантаження (дані MAC).

Перша службова частина кадру завжди передається на швидкості 1 Мб/с, корисне навантаження може передаватися на швидкостях 1 або 2 Мб/с.

Поля кадру виконують наступні функції.

- Синхронізація.

Попередня послідовність PLCP починається з 80 біт синхронізації, що є послідовністю 010101... . Дана послідовність використовується для синхронізації потенційних приймачів і для виявлення сигналу ССА (алгоритм оцінки чистоти каналу).

- Стартовий роздільник кадру (SFD).

16 біт указують початок кадру, забезпечуючи кадрову синхронізацію. Послідовність SFD має вигляд 0000110010111101.

- Довжина слова PLCP_PDU (PLW).

Перше поле заголовку PLCP – це довжина в байтах інформаційного блоку, включаючи 32-бітовий код CRC в кінці корисного навантаження. Поле корисного навантаження може мати розмір від 0 до 4095 байт.

- Сигнальне поле PLCP (PSF).

В даний час в цьому чотирьохбітовому полі заданий один біт, який вказує швидкість передачі наступної за ним інформації (1 або 2 Мб/с).

- Контрольна сума заголовку (HEC)

Це поле завдовжки 16 біт. Воно використовується для визначення помилок заголовку PLCP.

При використанні методу частотних стрибків смуга 2,4 ГГц ділиться на 79 каналів по 1 МГц. Відправник і одержувач погоджують схему перемикавання каналів (на вибір є 22 таких схеми), і дані надсилаються послідовно по різних каналах з використанням цієї схеми. Схеми перемикавання розроблені так, щоб мінімізувати шанси того, що два відправники використовуватимуть один і той же канал одночасно.

Максимальна швидкість методу FHSS обмежена 2 Мб/с. Це обмеження спричинене тим, що під один канал виділяється рівно 1 МГц, що примушує FHSS системи використовувати весь діапазон 2,4 ГГц – 2,483 ГГц. При цьому повинно відбуватись часте перемикавання каналів (наприклад, в США встановлена мінімальна швидкість 2,5 перемикавання в секунду), що, у свою чергу, приводить до збільшення накладних витрат.

Передача з розширенням спектру методом прямої послідовності (DSSS)

DSSS – це альтернативний метод розширення спектру з використанням розділення за кодом, а не за частотою [О: 2,3,4,6]. Ключовою особливістю даного методу є стійкість до перешкод.

Головна ідея методу полягає в тому, щоб забезпечити необхідну пропускну здатність каналу при меншому рівні потужності сигналу (зменшення відношення сигнал/шум) за рахунок додаткової обробки сигналу з метою стійкого прийому інформаційних біт. Розширення спектру відбувається за допомогою використання псевдовипадкового (PN) цифрового коду, що «розтягує» кожен біт. PN-сигнал отримав назву чіп-коду, в якому кожен чіп представляє біт даних, оброблений за допомогою PN-коду. Кожен біт даних, що передається, спочатку складається по модулю 2 («виключаюче або») з кожним бітом PN-коду, а потім отримана послідовність розширених бітів модулюється для передачі по каналу з певною смугою пропускання.

При передачі інформації за методом DSSS в мережі IEEE 802.11 розширення досягається за допомогою 11-бітової послідовності (+1,-1,-1,+1,-1,+1,+1,-1,-1,-1), яку називають кодом Баркера [О: 2,3,4,6]. В результаті кожен біт перетворюється в групу з 11 бітів. Така висока надмірність для кожного біта дозволяє істотно підвищити надійність передачі, при цьому значно понизивши потужність сигналу, що передається. Навіть якщо частина сигналу буде втрачена, він в більшості випадків все рівно буде відновлений. Тим самим мінімізується число повторних передач даних. У приймачі для отримання початкової послідовності бітів також виконується операція складання по модулю 2 «розтягнутого» біта з PN-кодом. При цьому отриманий «розтягнутий» біт повинен складатися або лише з нулів, або лише з одиниць, що дозволяє приймати і відновлювати дані, які були частково пошкоджені при передачі. Алгоритм відновлення даних достатньо простий: якщо в отриманому після складання по модулю 2 «розтягнутому» біті присутні і одиниці і нулі, то прийнятим вважається значення, яке зустрічається частіше. Наприклад, якщо

після демодуляції і складання по модулю 2 отримано 11-бітову послідовність 11011111101, біти, що мають значення 0, вважатимуться помилковими, а прийнятим вважатиметься значення 1.

Стандарт IEEE 802.11 також встановлює для схеми DSSS використання діапазону на частоті 2,4 ГГц – 2,483 ГГц і пропонує швидкість передачі 1 або 2 Мб/с. Для передачі із швидкістю 1 Мб/с використовується диференціальна двійкова фазова модуляція (DBPSK), а для передачі із швидкістю 2 Мб/с – диференціальна квадратурна фазова модуляція (DQPSK). Як і раніше максимальна потужність EIRP складає для Європи 100 мВт.

Кадр фізичного рівня при використанні схеми DSSS наведено на рис. 5.4.

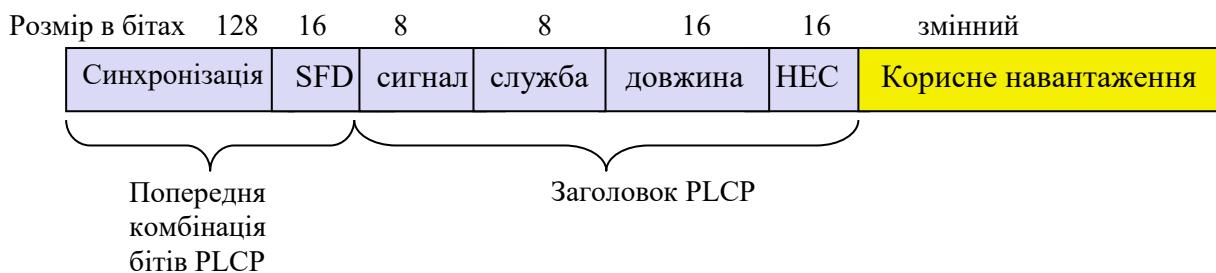


Рисунок 5.4 - Формат кадру при використанні схеми DSSS

Кадр складається з двох частин – PLCP (попередня комбінація бітів і заголовок) і корисного навантаження. Для передачі PLCP використовується швидкість 1 Мб/с, корисне навантаження (тобто дані MAC) може передаватися на швидкості 1 або 2 Мб/с. Поля кадру виконують наступні функції.

- Синхронізація

Перші 128 біт використовуються не тільки для синхронізації, але і для регулювання підсилення, виявлення енергії (для CCA) і компенсації зсуву частоти.

- Стартовий роздільник кадру (SFD)

Дане 16-бітове поле використовується для синхронізації на початку кадру і включає фіксований код 1111001110100000.

- Сигнал.

Значення для цього поля указують на швидкість передачі корисного навантаження. Наприклад, значення 0x0A вказує на швидкість 1 Мбіт/с (а отже, модуляцію DBPSK), 0x14 вказує, що буде використовуватись швидкість 2 Мб/с (і модуляція DQPSK).

- Служба.

Дане поле зарезервоване для майбутнього використання (стандартно використовується значення 0x00, яке вказує на те, що передається кадр стандарту IEEE 802.11).

- Довжина.

Як і в інших системах, 16 біт використовується для визначення розміру поля даних.

- Перевірка на наявність помилок в заголовку (FCS).

Поля сигналу, служби і довжини захищені даною контрольною сумою.

У методі DSSS діапазон 2,4 – 2,483 ГГц ділиться на 14 каналів, що частково перекриваються (у США доступно тільки 11 каналів). Для того, щоб декілька каналів могли використовуватися одночасно в одному і тому ж місці, необхідно, щоб вони відрізнялись один від одного на 25 МГц (не перекривалися для виключення взаємних перешкод). Таким чином, в одному місці може одночасно використовуватися максимум 3 канали. Дані пересилаються з використанням одного з цих каналів без перемикання на інші канали.

5.3. Канальний рівень IEEE 802.11

Канальний рівень IEEE 802.11 складається з двох підрівнів: управління логічним зв'язком (Logical Link Control, LLC) і управління доступом до середовища (Media Access Control, MAC). IEEE 802.11 використовує той же LLC і 48-бітову адресацію, що і інші мережі IEEE 802. Це дозволяє легко об'єднувати бездротові і дротові мережі, проте MAC рівень має кардинальні відмінності.

MAC рівень IEEE 802.11 дуже схожий на той, що реалізований в IEEE 802.3, де використовується протокол множинного доступу з контролем несучої

та визначенням колізій. Але, стандарт IEEE 802.11 передбачає використання напівдуплексних прийомопередавачів, тому в бездротових мережах IEEE 802.11 станція не може виявити колізію під час передачі. Щоб врахувати цю відмінність, IEEE 802.11 використовує модифікований протокол, відомий як Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) – множинний доступ з контролем несучої та запобіганням колізіям або розподілена координаційна функція (Distributed Coordination Function – DCF) [О: 2,3,4,6]. У CSMA/CA для обробки колізій використовується кадр підтвердження (ACK), який повідомляє про те, що кадр даних отриманий без пошкоджень.

CSMA/CA працює наступним чином. Станція, що прагне передавати, перевіряє канал і, якщо не виявлено активності, станція чекає протягом деякого випадкового проміжку часу, а потім починає передачу, якщо середовище передачі даних все ще вільне. Якщо кадр приходить цілим, приймаюча станція посилає кадр ACK, після прийому якого відправником завершується процес передачі. Якщо станція, що передає, не отримала кадр з підтвердженням ACK внаслідок того, що не був отриманий кадр даних або кадр прийшов пошкодженим, робиться припущення, що відбулася колізія, і кадр даних передається повторно через випадковий проміжок часу.

Для визначення того, чи є канал вільним, використовується алгоритм оцінки чистоти каналу (Channel Clearance Algorithm, CCA) [О: 2,3,4,6]. Його суть полягає у вимірюванні енергії сигналу на антені і визначенні потужності прийнятого сигналу (RSSI). Якщо потужність прийнятого сигналу нижче певного порогу, то канал є вільним, і MAC рівень отримує статус CTS («дозвіл передачі»). Якщо потужність вища за порогове значення, передача даних затримується відповідно до правил протоколу. Стандарт надає ще одну можливість визначення незайнятості каналу, яка може використовуватися або окремо, або разом з вимірюванням RSSI – метод перевірки несучої. За допомогою цього методу проводиться перевірка на тип несучої (частотний канал) відповідно до специфікації 802.11. Найкращий метод для використання залежить від того, який рівень перешкод в робочій області.

Таким чином, механізм явного підтвердження ефективно вирішує проблеми перешкод. Однак він додає деякі додаткові накладні витрати, яких немає в IEEE 802.3, тому мережі IEEE 802.11 будуть завжди працювати повільніше, ніж аналогічні їм локальні мережі різних версій стандарту IEEE 802.3.

Інша специфічна проблема MAC-рівня – це проблема «прихованого терміналу», коли дві станції можуть «чути» точку доступу, але не можуть «чути» одна одну через наявність великої відстані або перешкод. Для вирішення цієї проблеми в IEEE 802.11 на MAC рівні доданий необов'язковий протокол Request to Send/Clear to Send (RTS/CTS) [О: 2,3,4,6]. Коли використовується цей протокол, станція-відправник передає кадр «RTS» і чекає відповіді точки доступу з кадром «CTS». Оскільки всі станції в мережі можуть «чути» точку доступу, сигнал CTS змушує їх відкласти свої передачі, що дозволяє станції-відправнику передати дані й одержати кадр «ACK» без виникнення колізій. Так як протокол RTS/CTS додає додаткові накладні витрати на мережу, тимчасово резервуючи канал, то він зазвичай використовується тільки для пакетів дуже великого об'єму, для яких повторна передача була б занадто дорогою.

У загальному випадку, рівень керування доступом до середовища (MAC) виконує кілька функцій. Насамперед, це власне контроль доступу до середовища, а також: підтримка роумінгу, автентифікація та економія потужності. Основною службою, яку пропонує рівень MAC, є обов'язкова служба асинхронної передачі й можлива служба термінових додатків. Стандарт IEEE 802.11 передбачає асинхронну передачу тільки в режимі тимчасових (ad-hoc) мереж. Асинхронна служба підтримує широкомовлення й багатоадресну передачу, а також обмін пакетів за принципом «без зобов'язань», тобто при передачі не встановлюється величина затримки.

У стандарті IEEE 802.11 визначено три основних механізми доступу: обов'язковий основний метод на основі CSMA/CA, альтернативний метод, що дозволяє уникнути проблеми «прихованого терміналу» і безконфліктний метод

опитування для термінових служб [О: 2,3,4,6]. Перші два методи іноді поєднуються під загальною назвою – розподілена координаційна функція (DCF), третій метод називається точковою координаційною функцією (PCF). Схема DCF пропонує тільки асинхронну службу, тоді як PCF пропонує і асинхронну, і термінову службу (необхідна точка доступу для керування доступом до середовища і попередження конфліктів). Механізми MAC стандарту IEEE 802.11 також ще називають розподіленим бездротовим керуванням доступом до середовища (DFWMAC).

5.4. Кадри рівня MAC

Кадр рівня MAC стандарту IEEE 802.11 має такий вигляд (рис. 5.5) [О: 2,3,4,6, Д:5].

байти	2	2	6	6	6	2	6	0-2312	4
	Керування кадром	Тривалість	Адреса 1	Адреса 2	Адреса 3	Керування послідовністю	Адреса 4	Дані	CRC

Рисунок 5.5 - Формат кадру рівня MAC

Керування кадром. Поле довжиною 2 байти складається з декількох підполів, що несуть інформацію про версію протоколу, тип кадру (керуючий, перевірочний, дані), про фрагментацію переданого кадру, інформацію про конфіденційність та 2-бітве поле системи розподілу (DS), яке визначає призначення чотирьох адресних полів кадру.

Ідентифікатор тривалості. Поле використовується для схеми віртуального резервування каналу із застосуванням методу RTS/CTS і містить значення, яке вказує період планованого заняття середовища.

Адресні поля. Чотири адресні поля довжиною 48 біт кожне. Мають те саме призначення, що й адресні поля MAC рівня в інших стандартах серії IEEE 802.x.

Керування послідовністю. Дане поле призначене для виявлення й відсіювання фрагментів, що дублюються.

Поле даних. Кадр MAC може містити довільні дані (до 2312 байт), що передаються від відправника одержувачеві (одержувачам).

Контрольна сума (CRC). 32-бітовий код CRC для перевірки помилок передачі кадру.

Кадри рівня MAC можуть передаватися між мобільними станціями, між мобільними станціями і точкою доступу, а також між точками доступу. Ці випадки розрізняються двома бітами в полі керування кадром DS («до DS» та «від DS»), що визначають призначення чотирьох адресних полів. У таблиці 5.2 представлені чотири можливих значення бітів DS і відповідна інтерпретація чотирьох адресних полів.

Таблиця 5.2 - Інтерпретація MAC-адрес у кадрі MAC 802.11

До DS	Від DS	Адреса 1	Адреса 2	Адреса 3	Адреса 4
0	0	DA	SA	BSSID	–
0	1	DA	BSSID	SA	–
1	0	BSSID	SA	DA	–
1	1	RA	TA	DA	SA

Кожна станція, точка доступу або бездротовий вузол використовують адресу 1, що ідентифікує фізичного одержувача (одержувачів). Наступна адреса 2 представляє фізичного відправника кадру. Два адресних поля, що залишилися, використовуються для логічного присвоєння кадрів (логічний відправник, ідентифікатор BSS, логічний одержувач).

Для адресації можливі чотири сценарії.

- Тимчасова (Ad-hoc) мережа. Якщо обидва біти DS встановлено в «0», кадр MAC включає пакет, який передається між двома бездротовими вузлами без участі в обміні системи розподілу. У цьому випадку DA позначає адресу призначення пакета (destination address), SA – адресу відправника (source address) кадру, що відповідає фізичним адресам приймача й передавача. Третя

адреса ідентифікує незалежний базовий набір служб (IBSSID). Четверта адреса не використовується.

- Інфраструктурна мережа (від AP). Якщо задано тільки біт «від DS», кадр походить від точки доступу. DA – це фізичний і логічний приймач, друга адреса визначає BSS, третя адреса визначає логічного відправника (MAC адреса джерела кадру). Даний випадок передбачає передачу за допомогою точки доступу.

- Інфраструктурна мережа (до AP). Якщо станція відправляє кадр іншій станції за допомогою точки доступу, встановлюється тільки біт «до DS». У цьому випадку перша адреса представляє фізичний приймач кадру – точку доступу. Друга адреса – це фізичний і логічний відправник кадру, третя – логічний одержувач.

- Інфраструктурна мережа (у межах DS). Останній випадок – кадри, що пересилаються між точками доступу в межах системи розподілу. Встановлюються обидва біти. Перша адреса - адреса приймача (receiver address – RA), представляє Mac-адресу приймаючої точки доступу. Друга адреса – адреса передавача (transmitter address – TA), визначає точку доступу, яка є відправником, в межах системи розподілу. Останні дві адреси – для визначення вихідного призначення кадру DA і вихідного джерела SA.

Керування кадром.

Поле керування кадром виконує наступні функції.

- Синхронізація.

До неї відноситься функція підтримки пошуку бездротової локальної мережі, синхронізації локальних таймерів вузлів та генерації сигналів-маячків.

- Керування живленням.

Функція, що контролює активність передавача з метою енергозбереження (наприклад, використання буферизації пакетів, періодичне перемикання «сплячого» і робочого режимів без втрати кадру).

- Роумінг.

Функція для приєднання до мережі (асоціації), зміни точок доступу і

пошуку точок доступу.

- Підтримка поточкових даних.
- База керуючої інформації (management information base – MIB).

Всі параметри, що представляють поточний стан бездротової станції і точки доступу, зберігаються в базі MIB для внутрішнього та зовнішнього доступу. Доступ до бази можливий через стандартні протоколи, наприклад, SNMP (simple network management protocol – простий протокол мережного керування).

Синхронізація. Всі вузли мережі обладнані внутрішніми таймерами, оскільки для виконання функцій енергозбереження, синхронізації при перескоку частот в FHSS, координації опитування в PCF вузли повинні бути синхронізовані один з одним або із точкою доступу. Для керування процесами обміну в мережі IEEE 802.11 задана синхронізуюча функція (timing synchronization function – TSF).

У межах базової системи BSS з інфраструктурою синхронізація виконується в такий спосіб. Точка доступу періодично відправляє сигнальні кадри (beacon frame). Ці кадри включають тимчасові мітки (timestamp) та іншу інформацію про налаштування точки доступу (наприклад, ідентифікатор BSS), необхідні для енергозбереження, роумінгу і т.д. Приймаючі станції використовують тимчасові мітки для налаштування своїх таймерів. Так як середовище не завжди вільне, передача сигналів квазіперіодична. Для підтримки синхронізації в мережі вузлам достатньо час від часу звіряти свої внутрішні таймери і перестроюватися при потребі. У тимчасових мережах ситуація трохи відрізняється, оскільки тут немає точки доступу, з якою могли б синхронізуватися всі вузли мережі. У цьому випадку кожен вузол підтримує власний таймер синхронізації і починає передачу сигнального кадру по закінченні сигнального інтервалу.

Керування живленням. Основний принцип керування живленням у мережах IEEE 802.11. полягає у відключенні трансиверів, коли в них немає необхідності. Оскільки при проектуванні схеми керування живленням не можна

напевно передбачити, коли трансивер повинен активізуватися для прийому/передачі пакету, то повинно передбачатися періодичне «пробудження» трансивера.

Реалізація ідеї енергозбереження включає використання для станцій двох станів – стану очікування (sleep state) і активного стану (awake state) – і буферизацію даних відправника. При спробі відправника зв'язатися зі станцією, що реалізує схему енергозбереження, він повинен буферизувати дані, якщо станція перебуває в стані очікування. Станції, що очікують, з іншого боку, повинні періодично на певний час переходити в активний стан. Протягом цих періодів всі відправники можуть повідомляти адресатів буферизованих інформаційних кадрів. Якщо станція виявляє, що входить у список адресатів, вона повинна залишатися в активному стані до завершення передачі. Вихід зі стану очікування в потрібний момент часу вимагає синхронізуючої функції (TSF), оскільки періоди активних режимів повинні збігатися для всіх станцій.

Керування живленням в інфраструктурних мережах відбувається значно простіше, ніж у тимчасових. Точка доступу постійно відслідковує інформацію, що приходить для вузлів, які працюють в енергозберігаючому режимі, і буферизує пакети, адресовані станціям. У кожному сигнальному пакеті, який відправляється точкою доступу, міститься карта індикації транспортного потоку (traffic indication map – TIM). Карта TIM включає список станцій, для яких у точці доступу занесені в буфер інформаційні кадри.

Функція TSF забезпечує своєчасний перехід вузлів у робочий режим для прийому сигнальних кадрів і карт TIM. Якщо карта TIM вказує, що одноадресний кадр буферизований для даної станції, станція переходить в активний режим. При багатоадресній (широкомовній) передачі станції завжди повинні перебувати в активному режимі. У робочий режим переходять також станції, яким необхідно відправити інформацію точці доступу. Слід також зазначити, що таймери TSF не вимикаються при переході станції в стан очікування.

Для тимчасових мереж керування живленням значно складніше. У цьому випадку немає точки доступу, яка займається буферизацією даних, але якщо станції бажають спілкуватися зі станцією, що працює в економічному режимі, вони повинні мати можливості буферизації. Тепер всі станції оголошують список буферизованих кадрів протягом періоду активності всіх станцій. Адреси кадрів оголошуються з використанням карти індикації тимчасового адресного потоку (ad hoc traffic indication map – АТІМ) – період оголошення називається вікном АТІМ. Однією з проблем даного підходу є масштабованість. Якщо в межах тимчасової мережі в режимі енергозбереження працює багато станцій, здійснити передачу в межах вікна АТІМ можуть побажати також велика кількість станцій. У результаті збільшиться ймовірність виникнення колізій і велика кількість станцій будуть змушені відкласти свою передачу.

Роумінг. MAC рівень 802.11 відповідає за те, яким чином клієнт підключається до точки доступу. Коли клієнт 802.11 потрапляє в зону дії однієї або декількох точок доступу, він на основі потужності сигналу і відслідкованого значення кількості помилок обирає одну з них і підключається до неї. Як тільки клієнт отримує підтвердження того, що він прийнятий точкою доступу, він настроюється на радіоканал, у якому вона працює. Час від часу він перевіряє всі канали 802.11, щоб подивитися, чи не надає інша точка доступу сервісу більш високої якості. Якщо така точка доступу знаходиться, то станція підключається до неї, перенастроюючись на її частоту (рис. 5.6).

Перепідключення зазвичай відбувається в тому випадку, якщо станція була фізично віддалена від точки доступу, що викликало ослаблення сигналу. В інших випадках повторне підключення відбувається через зміну радіочастотних характеристик або просто через наявність великого мережного трафіку через первісну точку доступу. В останньому випадку ця функція протоколу відома як «балансування навантаження», оскільки її головне призначення – розподіл загального навантаження на бездротову мережу найбільше ефективно по всій доступній інфраструктурі мережі.

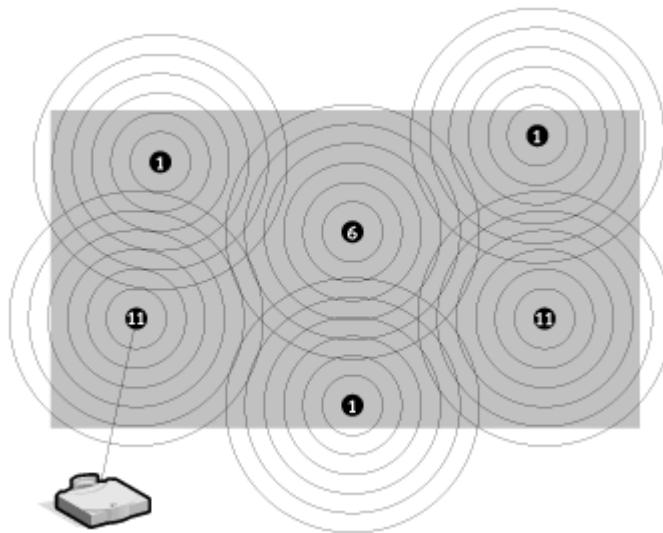


Рисунок 5.6 - Підключення до мережі та ілюстрація правильного призначення каналів для точок доступу

Підтримка поточкових даних. Поточкові дані, такі як відео або голос, підтримуються в специфікації 802.11 на MAC рівні за допомогою точкової координаційної функції (PCF). На противагу розподіленій координаційній функції (DCF), де керування розподілене між всіма станціями, у режимі PCF тільки точка доступу управляє доступом до каналу. У випадку, коли встановлений BSS з увімкненою PCF, час рівномірно розподіляється проміжками для роботи в режимі PCF і у режимі CSMA/CA. Під час періодів, коли система перебуває в режимі PCF, точка доступу опитує всі станції на предмет одержання даних. На кожную станцію виділяється фіксований проміжок часу, після закінчення якого виконується опитування наступної станції. Жодна із станцій не може передавати в цей час, за винятком тієї, котра опитується. Недоліком такої схеми є те, що точка доступу повинна виконувати опитування всіх станцій, що є надзвичайно неефективним у великих мережах.

5.5. Особливості стандарту IEEE 802.11a

Стандарт IEEE 802.11a є розширенням базового стандарту IEEE 802.11 і розрахований на роботу в діапазоні 5 ГГц (робочі частоти визначаються наступними діапазонами: 5,15 – 5,25 ГГц, 5,25 – 5,35 ГГц та 5,725 – 5,825 ГГц

загальною смугою 300 МГц) [О: 2,3,4,6, Д:5,8]. Всередині цього спектру існують дванадцять каналів по 20 МГц, кожен з яких має різні характеристики потужності передавача. Максимальна швидкість передачі становить 54 Мб/с.

У даному стандарті на фізичному рівні використовується технологія OFDM (ортогональний поділ частот). Найбільш істотне розходження між методом OFDM і технологіями DSSS й FHSS полягає в тому, що OFDM допускає паралельну передачу корисного сигналу одночасно по декількох частотах діапазону, у той час як технології розширення спектру передають сигнали послідовно. У результаті підвищується пропускна здатність каналу і якість сигналу.

Принцип роботи OFDM полягає в розподілі одного високошвидкісного каналу на деяке число більш повільних підканалів, по яких потім одночасно йде передача. З них виділяються підканали, що використовуються для передачі даних і корекції помилок. Завдяки цьому технологія OFDM забезпечує більш високу швидкість передачі даних і гарну перешкодостійкість.

OFDM технологія ділить переданий сигнал на 48 окремих несучих частот, щоб забезпечити передачу на рівнях 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Мб/с. Для кожної несучої частоти OFDM використовує квадратурну фазову модуляцію. Додатково чотири контрольних частоти забезпечують контроль для мінімізації частотних і фазових зсувів переданого сигналу. Такий спосіб передачі дозволяє OFDM досягати дуже високої ефективності, що веде до більш високих швидкостей передачі та мінімізує ефект багаторазового перекручування сигналу.

Технологія OFDM також обрана в якості базової технології для європейського аналогу IEEE 802.11a – стандарту HiperLAN, а також для стандарту 802.11g.

5.6. Особливості стандарту IEEE 802.11b

Використовує той самий частотний діапазон, що і стандарт 802.11 (2,4 – 2,483 ГГц). Основне доповнення, що внесене IEEE 802.11b в основний стандарт

– це підтримка двох нових швидкостей передачі даних – 5,5 та 11 Мб/с (підтримуються швидкості 1, 2, 5.5 та 11 Мб/с) [О: 2,3,4,6, Д:5,8]. Для досягнення цих швидкостей був обраний метод DSSS, оскільки метод частотних стрибків через обмеження не може підтримувати більш високі швидкості. Із цього випливає, що системи IEEE 802.11b будуть сумісні з DSSS системами IEEE 802.11, але не будуть працювати із системами FHSS IEEE 802.11.

Для підтримки дуже зашумлених середовищ, а також роботи на великих відстанях, мережі IEEE 802.11b використовують динамічний зсув швидкості, що дозволяє автоматично змінювати швидкість передачі даних залежно від властивостей радіоканалу. Наприклад, користувач може підключитися з максимальною швидкістю 11 Мб/с, але, у випадку, якщо підвищиться рівень перешкод або користувач віддаляється на велику відстань, мобільний пристрій почне передавати на меншій швидкості – 5.5, 2 або 1 Мб/с. У випадку, якщо можлива усталена робота на більш високій швидкості, мобільний пристрій автоматично почне передавати з більш високою швидкістю.

5.7. Особливості стандарту IEEE 802.11g

Стандарт 802.11g є логічним розвитком 802.11b і передбачає передачу даних у тому ж частотному діапазоні (2,4 – 2,483 ГГц). Крім того, стандарт 802.11g цілком сумісний з 802.11b, тобто будь-який пристрій 802.11g повинен підтримувати роботу із пристроями 802.11b [О: 2,3,4,6, Д:5,8]. Максимальна швидкість передачі в стандарті 802.11g становить 54 Мб/с (як і в стандарті 802.11a), тому на сьогоднішній день це найбільш перспективний стандарт бездротового зв'язку (підтримуються швидкості 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 та 54 Мб/с).

При розробці стандарту 802.11g розглядалися дві конкуруючі технології: метод ортогонального частотного розподілу OFDM, запозичений із стандарту 802.11a та запропонований до розгляду компанією Intersil, і метод двійкового пакетного згорткового кодування PBCC, який опціонально реалізований у

стандарті 802.11b і запропонований компанією Texas Instruments. У результаті стандарт 802.11g містить компромісне рішення: в якості базової застосовуються технології OFDM, а опціонально передбачене використання технології PBCC.

Метод PBCC-кодування опціонально використовується в протоколі 802.11b на швидкостях 5,5 та 11 Мб/с. Аналогічно, у протоколі 802.11g для швидкостей передачі 5,5 та 11 Мб/с цей спосіб теж використовується опціонально. У цьому плані до швидкості 11 Мб/с протоколи 802.11b та 802.11g співпадають один з одним.

5.8. Особливості стандарту IEEE 802.11n

Стандарт 802.11n для мереж Wi-Fi був затверджений організацією IEEE 11 вересня 2009 року [Д: 8].

Стандарт 802.11n розроблявся для вирішення таких задач:

- збільшення швидкості передачі даних;
- збільшення зони покриття;
- збільшення надійності передачі сигналу;
- збільшення пропускної здатності.

Стандарт 802.11n підвищує швидкість передачі даних практично вчетверо в порівнянні з пристроями стандартів 802.11g (максимальна швидкість яких дорівнює 54 Мбіт/с). Для підвищення пропускної здатності мережі стандартом 802.11n передбачено збільшення числа каналів шляхом використання принципу MIMO і мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналу (OFDM). Теоретично 802.11n здатний забезпечити швидкість передачі даних до 600 Мб/с, застосовуючи передачу даних зразу по чотирьом антенам (до 150 Мб/с на антену).

Пристрої 802.11n працюють в діапазонах 2,4 - 2,5 або 5,0 ГГц. Для пристроїв, які використовують для передачі даних частоту 5 ГГц характерна менша дальність у порівнянні з частотою 2,4 ГГц (пов'язано з збільшенням коефіцієнту загасання зі збільшенням частоти). Але, слід відзначити, що на

частоті 2,4 ГГц працює багато пристроїв, що робить бездротовий сигнал більш схильним до перешкод, ніж при використанні частоти 5 ГГц.

Багатоканальний вхід/вихід (MIMO)

Одною з основних особливостей стандарту 802.11n є використання технології MIMO (Multiple-Input Multiple-Output - багатоканальний вхід/вихід) [Д: 8]. За допомогою технології MIMO реалізована здатність одночасного прийому / передачі декількох потоків даних через кілька антен замість однієї (рис. 5.6). Послідовність, що передається, поділяється на паралельні потоки, з яких на приймальному кінці відновлюється вихідний сигнал. Основною проблемою такої передачі є те, що кожна антена приймає суперпозицію сигналів, які необхідно відокремлювати один від одного. Для цього на приймальному кінці застосовується спеціально розроблений алгоритм просторового виявлення сигналу.

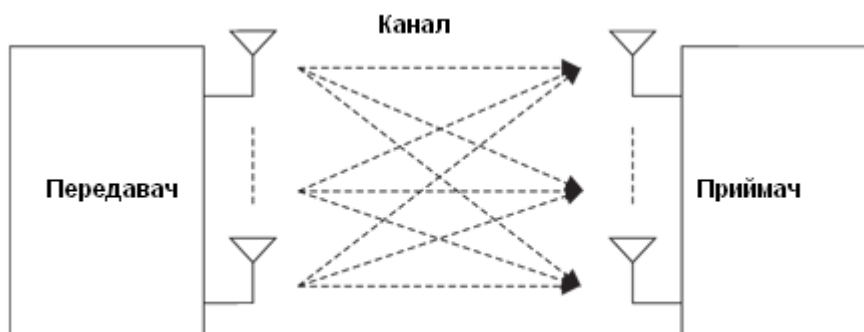


Рисунок 5.6 - Принцип роботи системи MIMO

Стандарт 802.11n визначає різні антенні конфігурації " $M \times N$ ", починаючи з " 1×1 " до " 4×4 " (найпоширеніші на сьогоднішній день це конфігурації " 3×3 " або " 2×3 "). Перше число (M) визначає кількість передавальних антен (T), а друге число (N) визначає кількість приймальних антен (R). Наприклад, точка доступу з двома передавальними і трьома приймальними антенами є " 2×3 " (або $2T3R$) MIMO-пристроєм.

Чим більше пристрій 802.11n використовує антен для одночасної роботи передачі / прийому, тим буде вище максимальна швидкість передачі даних.

Однак, саме по собі використання декількох антен не збільшує швидкість передачі. Основним в пристроях стандарту 802.11n є те, що в них реалізований вдосконалений метод обробки сигналу, який і визначає алгоритм роботи МІМО-пристрою при використанні декількох антен. Конфігурація "4x4" при використанні модуляції 64-QAM забезпечує швидкість до 600 Мб/с, конфігурація "3x3" при використанні модуляції 64-QAM забезпечує швидкість до 450 Мб/с, в той час як конфігурації "2x3" і "1x2" забезпечать швидкість до 300 Мб/с. При використанні МІМО "2x2" і підтримки модуляції 256-QAM (TurboQAM) в діапазоні 2,4 ГГц максимальна швидкість може скласти 400 Мб/с.

Ширина смуги пропускання каналу 40 МГц

Іншою особливістю стандарту 802.11n є збільшення ширини каналу з 20 до 40 МГц. Як вже було зазначено вище, у смузі частот 2.4 ГГц для бездротових мереж доступні 13 каналів (в деяких країнах 11) з інтервалами 5 МГц між ними [Д: 8]. Для передачі сигналу у стандартах 802.11b/g використовуються канали шириною 20 МГц. Бездротовий пристрій стандарту 802.11b/g використовує один з 13 каналів, але, фактично, задіє 5 пересічних каналів. Наприклад, якщо точка доступу використовує канал 6, то вона надає значні перешкоди на канали 5 і 7, а також надає перешкоди на канали 4 і 8. Це пов'язано з тим, що коли відбувається передача даних пристроєм, бездротовий сигнал відхиляється від центральної частоти каналу +/- 11 МГц. У деяких випадках відбувається відхилення енергії радіочастоти до 30 МГц від центрального каналу. Для виключення взаємних перешкод між каналами необхідно, щоб їх смуги відстояли один від одного на 25 МГц. Таким чином, залишається всього 3 непересічних канали з шириною полоси 20 МГц: 1, 6 і 11. Бездротові точки доступу, що працюють в смузі частот 2.4 ГГц, в межах однієї зони покриття повинні уникати перекриття каналів для забезпечення якості бездротової мережі.

Пристрої стандарту 802.11n можуть використовувати ширину каналу 20 або 40 МГц в будь-якому частотному діапазоні (2.4 або 5 ГГц). При

використанні ширини каналу 40 МГц (пристрої 802.11n) відбувається подвійне збільшення пропускної здатності в порівнянні з шириною каналу 20 МГц (пристрої 802.11b/g). Однак, при використанні смуги 40 МГц пристроями 802.11n на частоті 2.4 ГГц, їх роботі можуть заважати існуючі 802.11b / g точки доступу, що призведе до зниження продуктивності всього сегмента мережі.

У смузі частот 5 ГГц є 19 непересічних каналів, які більш придатні для застосування в пристроях стандарту 802.11n, що забезпечують максимально можливу швидкість передачі даних. Сигнали розподіляються без взаємного перекриття каналів з шириною смуги 40 МГц.

В залежності від ширини смуги пропускання, що використовується, виділяють такі режими роботи [Д: 8].

1. Успадкований режим. Цей режим потрібен для узгодження з попередніми версіями Wi-Fi. Він дуже схожий на режим роботи 802.11a/g, як по принципу роботи, так і по смузі пропускання, яка становить 20 МГц.

2. Подвійний успадкований режим. Пристрої використовують смугу 40 МГц, при цьому одні і ті ж дані посилаються по верхньому і нижньому каналу (кожен шириною 20 МГц), але зі зміщенням фази на 90 °. Структура кадру орієнтована на те, що приймачем сигналу є клієнт 802.11a/g. Дублювання сигналу дозволяє зменшити викривлення, підвищуючи тим самим швидкість передачі.

3. Режим з високою пропускною здатністю. Пристрої підтримують обидві смуги частот - 20 і 40 МГц. В цьому режимі станції обмінюються тільки кадрами 802.11n. Швидкість роботи мережі максимальна.

4. Режим верхнього каналу. У цьому режимі використовується тільки верхня половина діапазону 40 МГц. Пристрої можуть обмінюватися будь-якими кадрами (802.11a/g та 802.11n).

5. Режим нижнього каналу. У цьому режимі використовується тільки нижня половина діапазону 40 МГц. Пристрої також можуть обмінюватися будь-якими кадрами.

Режими роботи 802.11n

Пристрої 802.11n можуть працювати в трьох режимах: High Throughput (HT) або «чистому» режим (Greenfield-режим), HT Mixed або змішаному режимі та Non-HT або успадкований (Legacy) режимі [Д: 8].

Режим з високою пропускною здатністю HT (High Throughput)

Режим High Throughput (HT передбачає відсутність поблизу (в зоні покриття) діючих пристроїв 802.11b/g, що використовують ту ж смугу частот. Якщо ж такі пристрої існують в зоні покриття, то вони не зможуть спілкуватися з точкою доступу 802.11n. Таким чином, в цьому режимі точка доступу підтримує тільки клієнтів 802.11n, що дозволяє скористатися перевагами підвищеної швидкості і збільшеною дальністю передачі даних стандарту 802.11n.

Змішаний режим з високою пропускною здатністю - HT Mixed

В режимі HT Mixed пристрої стандарту 802.11n можуть бути використані одночасно з пристроями 802.11b/g. Режим HT Mixed забезпечить сумісність пристроїв, але пристрої 802.11n отримають зменшення пропускної здатності. В цьому режимі точка доступу 802.11n розпізнає наявність клієнтів 802.11b/g і буде використовувати більш низьку швидкість передачі даних, поки пристрій 802.11b/g здійснює прийом-передачу даних.

Режим з невисокою пропускною здатністю - Non-HT

Точка доступу 802.11n з використанням режиму Non-HT відправляє всі кадри в форматі 802.11b/g, щоб пристрій 802.11b/g змогли їх отримати. В цьому режимі точка доступу повинна використовувати ширину каналів 20 МГц і при цьому не будуть використовуватися переваги стандарту 802.11n. Для забезпечення зворотної сумісності всі пристрої повинні підтримувати цей режим. Потрібно враховувати, що точка доступу 802.11n з використанням режиму Non-HT не буде забезпечувати високу продуктивність. При використанні цього режиму передача даних здійснюється зі швидкістю, що підтримується самим повільним пристроєм.

Таким чином, при практичному застосуванні точок доступу стандарту 802.11n, переваги можуть бути досягнуті в повній мірі тільки за умови, що клієнти 802.11b/g відсутні і бездротова мережа працює в "чистому" режимі HT.

Кожному режиму роботи відповідає своя структура преамбули - службового поля кадру, яке вказує на початок передачі і служить для синхронізації приймача і передавача. У преамбулі міститься інформація про довжину кадру та його тип, включаючи вид модуляції, обраний метод кодування, а також всі параметри кодування. Щоб не допустити конфліктів в роботі пристроїв з MIMO і звичайних (з одного антеною) під час обміну між пристроями MIMO кадр супроводжується особливою преамбулою і заголовком. Отримавши таку інформацію, пристрої що працюють в успадкованому режимі, відкладають передачу до закінчення сеансу між пристроями MIMO. Крім того, структура преамбули визначає деякі первинні завдання приймача, такі як: оцінка потужності сигналу для системи автоматичного регулювання підсилення, виявлення початку пакета, зсув за часом і частотою.

Індекс модуляції і схеми кодування (MCS)

Точкам доступу і клієнтам 802.11n необхідно узгоджувати просторові потоки (Spatial Streams) і ширини каналу. Залежно від кількості антен виникають кілька просторових потоків. Повну теоретично можливу пропускну здатність стандарту 802.11n в 600 Мб/с можна досягти лише при використанні чотирьох передавальних і чотирьох прийомних антен (конфігурація "4x4" або 4T4R).

Стандарт 802.11n визначає індекс модуляції і схеми кодування MCS (Modulation and Coding Scheme) [Д: 8]. MCS - просте ціле число, що привласнюється кожному варіанту модуляції (всього можливо 77 варіантів). Кожен варіант визначає тип модуляції радіочастоти (Type), швидкість кодування (Coding Rate), захисний інтервал (Short Guard Interval) і значення швидкості передачі даних. Поєднання всіх цих факторів визначає реальну фізичну (PHY) або каналну швидкість передачі даних, починаючи від 6,5 Мб/с до 600 Мб/с (дана швидкість може бути досягнута за рахунок використання всіх

можливих опцій стандарту 802.11n). Тип модуляції і швидкість кодування визначають, як дані будуть передаватися в радіоефір. Наприклад, модуляція BPSK (Binary Phase Shift Keying) була включена в початковий стандарт 802.11, в той час як модуляція QAM (Quadrature Amplitude Modulation) була додана в 802.11a. Нові методи модуляції і кодування (64-QAM), як правило, більш ефективні і підтримують більш високі швидкості передачі даних, але застарілі методи і швидкості все ще підтримуються для сумісності. Наприклад, для досягнення максимальної швидкості з'єднання 300 Мб/с необхідно, щоб і точка доступу і бездротовий адаптер підтримували два просторові потоки (Spatial Streams) і подвоєну ширину каналу 40 МГц.

Значення MCS від 0 до 31 визначають тип модуляції і схеми кодування, які будуть використовуватися для всіх потоків. Значення MCS з 32 по 77 описують змішані комбінації, які можуть бути використані для модуляцій від двох до чотирьох просторових потоків. Точки доступу 802.11n повинні підтримувати MCS значення від 0 до 15, в той час як клієнти 802.11n повинні підтримувати MCS значення від 0 до 7. Всі інші значення MCS, в тому числі пов'язані з каналами шириною 40 МГц та скороченим захисним інтервалом (SGI - Short Guard Interval), є опціональними. SGI визначає інтервал часу між переданими символами (найменша одиниця даних, переданих за один раз). Цей інтервал допомагає при прийомі даних уникнути затримки, пов'язаної з міжсимвольними перешкодами (Inter-Symbol Interference - ISI) і подолати відлуння (відбиття звукових хвиль). У пристроях стандарту 802.11b/g використовується захисний інтервал 800 нс, а в пристроях 802.11n є можливість використання паузи всього в 400 нс.

Безпека

Стандарт 802.11n використовує заходи безпеки стандарту 802.11i (WPA2), які підтримувались і на пристроях стандарту 802.11a/g. Нова система запобігання вторгнень (IPS - Intrusion Prevention System) в бездротовій мережі працює також як і раніше і здатна виявляти і реагувати на небезпечні (Rogue

AP) точки доступу 802.11n. Слід відзначити, що можливе виявлення пристроїв 802.11n, які працюють тільки в режимах Non-HT або Mixed HT.

5.9. Особливості стандарту IEEE 802.11ac

Стандарт 802.11ac передбачає передачу даних тільки на частоті 5ГГц. Буде забезпечена зворотна сумісність з пристроями 802.11n (в 5ГГц) та 802.11a [Д: 8]. Найбільшою перевагою стандарту 802.11ac є усунення завад за рахунок переходу на більш ефективний для передавання даних діапазон 5ГГц (у смугах частот від 80 до 160 МГц).

Мережі стандарту 802.11n дозволяють передавати дані на максимальній швидкості до 150 Мб/с від однієї антени, тоді як мережі стандарту 802.11ac – на швидкості до 867 Мб/с, а за наявності одразу восьми антен швидкість може досягти позначки 7 Гб/с. При цьому очікується істотне збільшення не тільки смуги пропускання, але і покриття.

Важливим нововведенням стандарту 802.11ac є технологія MU-MIMO (Multiple User MIMO) [Д: 8]. Це фактично просторовий радіокомутатор, який дозволяє одночасно передавати і приймати дані від великої кількості користувачів по одному частотному каналу. Технологія MIMO, реалізована в стандарті 802.11n, забезпечує одночасну роботу по передачі/прийому даних між пристроями мережі. Але в конкретний момент часу тільки один клієнт може отримувати і відправляти дані, тоді як інші чекають своєї черги. На відміну від MIMO, MU-MIMO створює багатопотоковий канал передачі, при використанні якого інші клієнти не чекають своєї черги. Пристрої з підтримкою MU-MIMO можуть забезпечувати одночасну передачу чотирьох потоків даних (до чотирьох клієнтів). Це дозволяє реалізувати більш ефективне використання бездротової мережі і скоротити затримки (час очікування на обслуговування), які виникають при значному збільшенні числа клієнтів в мережі.

Існує дві версії стандарту 802.11ac: Wave 1 та Wave 2 (рис. 5.7) [Д: 8].

	802.11n	802.11n IEEE Specification	802.11ac Wave 1 Today	802.11ac Wave2 WFA Certification Process Continues	802.11ac IEEE Specification
Band	2.4 GHz & 5 GHz	2.4 GHz & 5 GHz	5 GHz	5 GHz	5 GHz
MIMO	Single User (SU)	Single User (SU)	Single User (SU)	Multi User (MU)	Multi User (MU)
PHY Rate	450 Mbps	600 Mbps	1.3 Gbps	2.34 Gbps – 3.47 Gbps	6.9 Gbps
Channel Width	20 or 40 MHz	20 or 40 MHz	20, 40, 80 MHz	20, 40, 80, 80-80, 160 MHz	20, 40, 80, 80-80, 160 MHz
Modulation	64 QAM	64 QAM	256 QAM	256 QAM	256 QAM
Spatial Streams	3	4	3	3-4	8
MAC Throughout*	293 Mbps	390 Mbps	845 Mbps	1.52 Gbps – 2.26 Gbps	4.49 Gbps

* Assuming a 65% MAC efficiency with highest MCS

Рисунок 5.7 - Базові характеристики актуальних версій стандарту 802.11x

Нова версія стандарту 802.11ac Wave 2 базується на попередній (Wave 1; використовується у пристроях з 2013 р.), але має ряд суттєвих відмінностей [Д: 8]:

- підвищена продуктивність з 1.3 Гб/с до 2.34 Гб/с;
- додана підтримка Multi User MIMO (MU-MIMO);
- допускається використання каналів з шириною полоси 160 МГц;
- використовується четвертий просторовий потік (Spatial Stream) для більшої продуктивності і стабільності;
- збільшена (з 37 у попередніх версіях) кількість частотних каналів в діапазоні 5 ГГц.

Максимальна модуляція залишилася без змін - 256 QAM. Якщо раніше для каналної швидкості 866.6 Мб/с було потрібно 2 потоки і ширина каналу в 80 МГц, то тепер цієї каналної швидкості можна досягти при використанні всього одного потоку, вдвоє збільшивши при цьому ширину каналу - з 80 до 160 МГц. Використання каналів шириною 160 МГц дозволило збільшити і максимальну каналну швидкість (PHY Rate на рис. 3.13) - до 2,6 Гб/с. На

практиці, реальна швидкість становить приблизно 65% від каналної (MAC Throughout на рис. 3.13).

Діапазон частот залежить від регіональних обмежень і, як правило, використовуються діапазони 5,15-5,35 ГГц та 5,47-5,85 ГГц. 802.11ac, як і попередні версії, може використовувати канали шириною 20 і 40 МГц, але високої продуктивності можна досягти використовуючи тільки канали шириною 80 МГц або 160 МГц. Оскільки на практиці далеко не завжди можливо використовувати суцільну смугу в 160 МГц, стандартом передбачений режим 80 + 80 МГц, який поділить смугу в 160 МГц на 2 різні діапазони.

Підтримка технології формування спрямованого сигналу Beamforming

У стандарті 802.11ac опціонально була реалізована підтримка технології формування спрямованого сигналу Beamforming (іноді її називають технологією адаптивного формування діаграми спрямованості Transmit Beamforming або Tx Beamforming) [Д: 8]. Дана технологія вирішує проблему зменшення потужності сигналу, викликану його відбиттям від різних предметів і поверхонь.

Технологія Beamforming працює наступним чином. Радіосигнали, прийняті від клієнтів, допомагають точці доступу визначити їх місце розташування і ця інформація використовується в подальшому для розрахунку і формування вузько направленої сигналу (в звичайному режимі роботи сигнал від приймача розходить рівномірно на всі боки, а при Beamforming направляється в строго визначеному напрямку, що досягається за допомогою декількох антен). Застосування технології Beamforming дозволяє більш ефективно використовувати смугу пропускання, що позитивно позначається на роботі потокових додатків або додатками, які дуже чутливі до пропускну здатності і затримок в мережі.

5.10. Особливості стандарту IEEE 802.11ad

Сьогодні в області бездротового зв'язку спостерігається явна тенденція збільшення швидкостей передачі даних і, як наслідок, брак доступного радіоспектра. У зв'язку з цим, предметом активного дослідження виступає можливість застосування міліметрового діапазону в мережах бездротового зв'язку п'ятого покоління. Серед можливих кандидатів виступає технологія 802.11ad / WiGig, яка відрізняється малим радіусом дії і частотою в 60 ГГц [Д: 8]. Стандарт 802.11ad вважається одним з найбільш перспективних рішень для високопродуктивних бездротових систем. На рис. 5.8 наведено розподіл частотного спектру, виділеного для цього стандарту у різних країнах. Для роботи в цьому діапазоні виділено чотири канали, кожен з яких має смугу пропускання в 2,16 ГГц. Для порівняння - це в 54 рази більше, ніж 40 МГц канали, доступні на обладнанні 802.11n. У 802.11ad використовується тільки 1 просторовий потік (тобто система SISO замість MIMO у стандарті 802.11ac) [Д: 8]. Враховуючи, що стандарт 802.11ad працює в діапазоні 60 ГГц, його сумісність з іншими стандартами 802.11x не передбачена.

У міліметровому діапазоні для компенсації великих втрат потужності сигналу, що передається (сигнали високої частоти швидко загасають), зазвичай використовується порівняно нова технологія beamforming, що дозволяє формувати діаграму спрямованості, спрямовану максимумом точно в бік приймача. У сучасній радіоелектронній апаратурі beamforming реалізується на основі фазованих антенних решіток (ФАР). На практиці beamforming дозволяє забезпечити можливість управління променем в діапазоні 100 - 120 градусів. В результаті, при використанні цієї технології для точок доступу необхідно використовувати кілька антенних радіомодулів для досягнення охоплення в усьому діапазоні кутів до 360 градусів. Для кожного радіочастотного модуля бажано використовувати окремий канал зв'язку. Однак, в діапазоні 60 ГГц доступні тільки 4 канали і в цьому діапазоні можуть існують значні перешкоди для сигналів, що передаються.

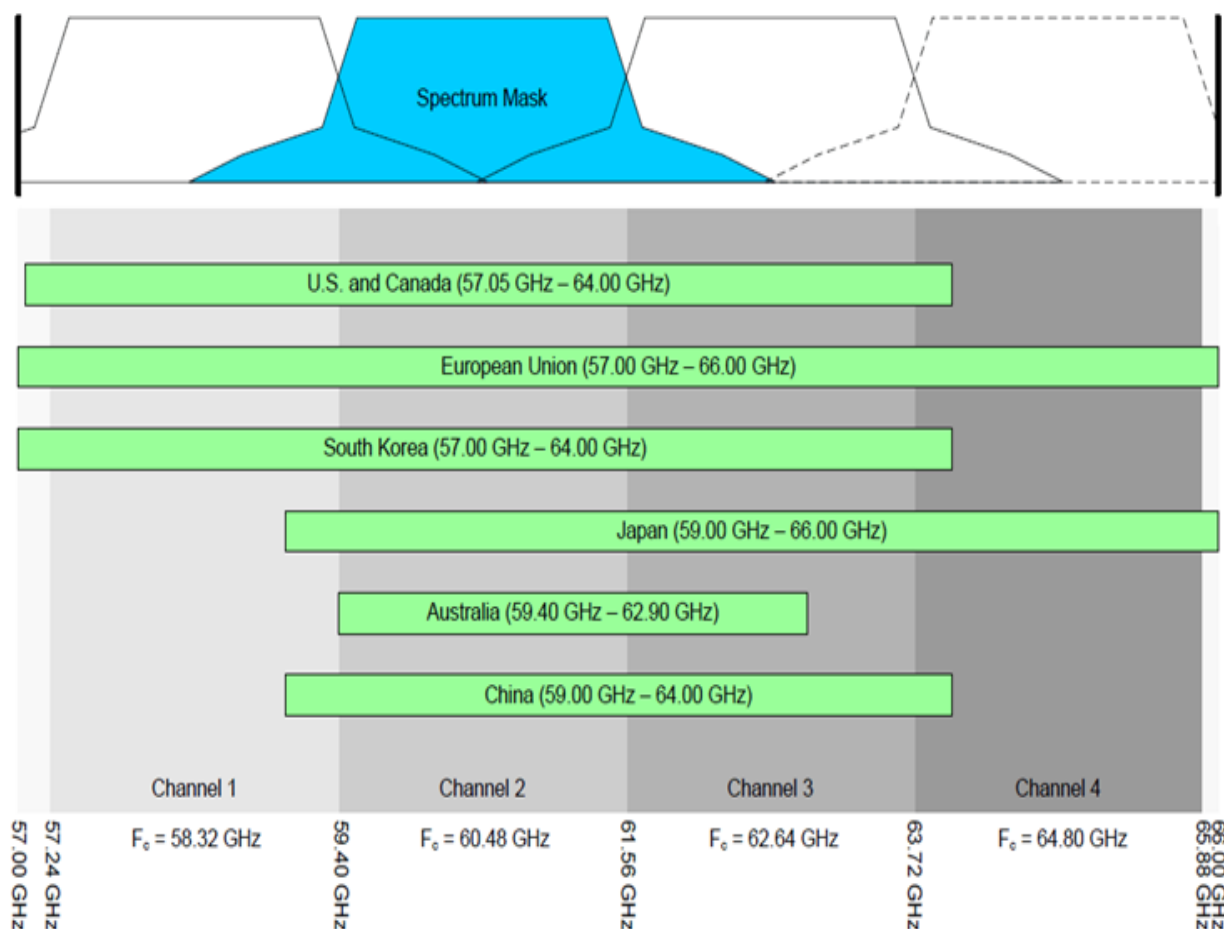


Рисунок 5.8 - Розподіл частотного спектру, виділеного для стандарту 802.11ad у різних країнах

IEEE 802.11ad/WiGig використовує надзвичайно широку смугу пропускання 1,76 ГГц на один канал з інтервалом між ними в 2,16 ГГц. Це призводить до того, що на відміну від звичайних стільникових систем, приймач з частотою 60 ГГц має погану вибірковість по каналу, що потенційно викликає великі перешкоди в сусідньому каналі в залежності від місця розташування клієнта.

Технічні рішення в 802.11ad

Модуляція і кодування. В 802.11ad визначено два методи модуляції: SC - Single Carrier, і OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing [Д: 8]. OFDM використовується для зв'язку на великих відстанях і, відповідно, при великих затримках при поширенні сигналу. OFDM реалізується спільно з

SQPSK, QPSK, 16-QAM і 64-QAM модуляцією, при цьому максимально досяжна швидкість передачі даних на фізичному рівні (PHY) становить 6,756 Гб/с. SC модуляція розрахована на роботу з пристроями, що мають невеликий форм-фактор і порівняно низький рівень споживання енергії. До такого типу пристроїв відносяться, наприклад, звичайні стільникові телефони та планшети. SC використовує $\pi/2$ -B/SK, $\pi/2$ -QPSK та $\pi/2$ -16-QAM модуляції. При цьому досягається максимальна швидкість - до 4,62 Гб/с на фізичному рівні. У стандарті використовується LDPC кодер зі швидкістю кодування 1/2, 5/8, 3/4 і 13/16.

На рис. 5.9 наведені схеми модуляції і кодування (Modulation and Coding Schemes - MCS), які використовуються в стандартах 802.11n/ac/ad для досягнення гігабітних швидкостей [Д: 8]. Слід відмітити, що в 802.11n/ac використовується довгий захисний інтервал в 800 нс між передачею двох символів та можлива робота з коротким захисним інтервалом в 400 нс. Захисний інтервал в 802.11ad становить всього 48,4 нс.

Beamforming - технологія адаптивного формування діаграми спрямованості. Із зростанням частоти радіосигналу технологія beamforming є обов'язковою частиною, так як на частотах в десятки гігагерц сигнал загасає дуже швидко і не так добре може огинати перешкоди. Таким чином, якщо приймач і передавач перебувають не на прямої видимості, то ймовірність отримання сигналу сильно зменшується. Тому, для підвищення потужності радіосигналу в приймачі, антена розгортається на джерело сигналу. Як було зазначено вище, beamforming реалізується на фазованих антенних решітках, в яких форма діаграми спрямованості задаються шляхом регулювання амплітудного і фазового розподілу струмів на елементах решітки, таким чином зосереджуючи потужність сигналу в потрібному напрямку.

Модуляція	Швид. коду вання	Чутливість приймача (дБм)					EVM (dB)
		20 МГц	40 МГц	80 МГц	160 МГц	2.16 ГГц	
		Ширина полоси	Ширина полоси	Ширина полоси	Ширина полоси	Ширина полоси	
BPSK	1/2	-82	-79	-76	-73	-	-5
QPSK	3/4	-77	-74	-71	-68	-	-13
16-QAM	3/4	-70	-67	-64	-61	-	-19
64-QAM	5/6	-64	-61	-60	-57	-	-27
256-QAM	5/6	-57	-54	-51	-48	-	-32
p/2-BPSK	1/2	-	-	-	-	-78	-6
p/2-BPSK	3/4	-	-	-	-	-64	-10
p/2-QPSK	3/4	-	-	-	-	-59	-13
p/2 16-QAM	3/4	-	-	-	-	-53	-21
64-QAM	13/16	-	-	-	-	-47	-26
Стандарт/ Швидкості		802.11n/ 6,5 - 600 Мб/с			802.11ad/ 385 - 6700 Мб/с		
		802.11 ac/ 6,5 - 6922 Мб/с					

*EVM (Error vector magnitude)- величина вектора похибки – показник якості модуляції в цифрових системах зв'язку (визначається як векторна різниця між ідеальним опорним сигналом і вимірюваним сигналом)

Рисунок 5.9 - Схеми модуляції і кодування стандартів 802.11n/ac/ad

5.11. Інші специфікації сімейства IEEE 802.11x

802.11c

Специфікація описує таблиці маршрутизації для бездротових «мостів».

802.11d

Специфікація, що містить універсальні вимоги до фізичного рівня 802.11 (процедури формування каналів, псевдовипадкові послідовності частот, додаткові параметри для MIB і т.д.).

802.11e

Специфікація технології QoS (Quality of Service) у застосуванні до бездротових мереж.

Специфікація 802.11e передбачає маркування пакетів, що належать до критичних потоків даних, спеціальними мітками пріоритету. Максимальний пріоритет одержують пакети потоків передачі голосу, як найбільш критичні до затримки і смуги пропускання, на другому місці йдуть потоки передачі відеоінформації, яким виділяється необхідна смуга при її наявності, а пакети передачі даних використовують ресурси, що залишилися.

802.11f

Специфікації 802.11f описують протокол обміну службовою інформацією між точками доступу (Inter-Access Point Protocol, IAPP), що необхідно для побудови розподілених бездротових мереж передачі даних.

802.11h

Описує можливість доповнення існуючих специфікацій 802.11 MAC (рівень доступу до середовища передачі) і 802.11a PHY (фізичний рівень у мережах 802.11a) алгоритмами ефективного вибору частот для офісних і вуличних бездротових мереж, а також засобами керування використанням спектра, контролю за випромінюваною потужністю і генерації відповідних звітів.

802.11i

У стандарті 802.11i визначена концепція надійно захищеної мережі – Robust Security Network (RSN). Він призначений для забезпечення інформаційної безпеки WLAN великих підприємств і невеликих офісів.

5.12. Безпека в мережах IEEE 802.11x

Однієї із найбільших проблем бездротових мереж з моменту їхньої появи була низька захищеність від перехоплення даних. Для контролю доступу кожна точка доступу має так званий ESSID (або WLAN Service Area ID), без знання якого мобільна станція не зможе підключитися до точки доступу. Додатково, точка доступу може зберігати список дозволених MAC адрес - так званий список контролю доступу (Access Control List, ACL) - дозволяючи доступ тільки тим клієнтам, чиї MAC адреси перебувають у списку.

Першою реалізацією системи захисту з шифруванням даних стала специфікація WEP (Wireless Equivalent Privacy) [О: 2,3,4,6], прийнята IEEE в 1999 році і заснована на шифруванні даних за допомогою 24-бітного ключа RC4. Найслабкіше місце WEP – відсутність механізму керування ключами. Після вибору ключа шифрування і повідомлення його користувачам він, як правило, ніколи не змінюється. Кожен, хто одержав доступ до даного ключа, без завад розкодує увесь зашифрований з його допомогою трафік. В якості виправлення WEP була прийнята специфікація TKIP (Temporal Key Integrity Protocol), що усунула всі відомі уразливі місця WEP, але значно вплинула на пропускну здатність мережі. TKIP забезпечила лише мінімальний рівень захисту, так як більш серйозні рішення вимагали б зміни апаратної частини бездротових пристроїв та зміни інших протоколів.

Стандарти WPA й 802.11i

Стандарт 802.11i, призначений для забезпечення інформаційної безпеки WLAN великих підприємств і невеликих офісів, задуманий з метою вдосконалення захисних функцій стандарту 802.11 [Д: 8]. Крім цього стандарту організацією Wi-Fi Alliance була запропонована власна технологія забезпечення інформаційної безпеки – WPA .

У стандарті IEEE 802.11i визначена концепція надійно захищеної мережі – Robust Security Network (RSN). Відповідно до вимог цієї концепції, бездротові клієнтські продукти і точки доступу повинні мати такі технічні характеристики, якими не володіє більшість існуючих пристроїв WLAN, включаючи велику

обчислювальну потужність і підтримку складних алгоритмів шифрування даних. Разом з тим, у стандарті 802.11i передбачена проміжна специфікація на так звану перехідну захищену мережу – Transitional Security Network (TSN), у якій допускається можливість одночасного використання рішень RSN та застарілих систем WEP. Однак, при цьому бездротова мережа буде захищена не настільки добре, як при переході на архітектуру RSN у масштабі всієї мережі.

Визначений за замовчуванням у стандарті IEEE 802.11i механізм забезпечення конфіденційності даних за основу має блочний шифр стандарту AES. Захисний протокол, що його використовує, одержав назву Counter-Mode CBC MAC Protocol або CCMP. Для цього протоколу AES грає ту ж роль, що й RC4 для протоколу TKIP. Основне розходження між протоколами CCMP й TKIP проявляється на нижніх рівнях моделі OSI, де відбуваються шифрування та розшифрування переданих даних: TKIP використовує чотири тимчасові ключі шифрування, тоді як AES – тільки три. Обидва протоколи працюють із тим самим механізмом керування ключами.

Між технологіями RSN та WPA багато спільного. Так, у них визначена ідентична архітектура системи безпеки з покращеними механізмами автентифікації користувачів і протоколами поширення та відновлення ключів. Але також є істотні розходження. Наприклад, технологія WPA базується на протоколі TKIP (Temporal Key Integrity Protocol), підтримку якого в більшості нині діючих пристроїв WLAN можна реалізувати шляхом оновлення їх ПЗ, а в більш функціональній концепції RSN передбачене використання стандарту AES (Advanced Encryption Standard), з яким сумісне лише новітнє обладнання для WLAN.

Захист у технології WPA базується на сукупності протоколів 802.1x, EAP, TKIP та RADIUS. Механізм автентифікації користувачів заснований на протоколах 802.1x (розроблений для провідних мереж) і EAP (Extensible Authentication Protocol). Останній дозволяє мережному адміністраторові задіяти безліч алгоритмів автентифікації користувачів за допомогою сервера RADIUS.

Протокол TKIP використовується на нижньому рівні моделі OSI для шифрування даних.

У технології WPA функції забезпечення конфіденційності та цілісності даних базуються на протоколі TKIP, що на відміну від протоколу WEP використовує більш ефективний механізм керування ключами, але той же самий алгоритм RC4 для шифрування даних. Відповідно до протоколу TKIP, мережні пристрої працюють із 48-бітовим вектором ініціалізації (на відміну від 24-бітового вектора ініціалізації протоколу WEP) і реалізують правила зміни послідовності його бітів, що виключає повторне використання ключів і здійснення replay-атак. У протоколі TKIP передбачена генерація нового ключа для кожного переданого пакету та поліпшений контроль цілісності повідомлень за допомогою криптографічної контрольної суми MIC (Message Integrity Code), що перешкоджає несанкціонованій зміні вмісту переданих пакетів (forgery-атака).

Функції автентифікації покладають на протокол EAP, що сам по собі є лише каркасом для методів автентифікації. Даний протокол досить просто реалізувати на автентифікаторі (точці доступу), оскільки йому не потрібно знати ніяких специфічних особливостей різних методів автентифікації. Автентифікатор слугує лише передатною ланкою між клієнтом і сервером автентифікації.

Система мережної безпеки стандарту WPA працює у двох режимах: PSK (Preshared Key) і Enterprise (корпоративний). Для розгортання системи, що працює в режимі PSK, необхідний розділюваний пароль. Таку систему нескладно встановлювати, але вона захищає WLAN не настільки надійно, як це робить система, що функціонує в режимі Enterprise з ієрархією динамічних ключів.

Для того, щоб точки доступу WLAN стали сумісними зі стандартом WPA, досить модернізувати їх ПЗ. А для переведення мережної інфраструктури на стандарт 802.11 буде потрібно нове обладнання, що підтримує алгоритм шифрування AES.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Основна література

1. Технологии передачи данных. 7-е изд./ Г.Хелд. – СПб.: Питер, К.: Издательская группа BHV, 2003. – 729 с.
2. Гепко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко. А.В. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. – К.: «ЕКМО», 2009. – 672 с.
3. Кучернюк П. В. Текст лекцій з дисципліни «Комп'ютерні мережі та засоби телекомунікацій», розділ «Засоби телекомунікацій» для студентів спеціальності 7.05090201, 8.05090201 «Радіоелектронні апарати та засоби». – К.: НТУУ «КПІ», 2013 р. – 127 с.
4. Руководство по технологиям объединенных сетей / Под редакцией Крикуна А.Н. 4-е издание. : Пер. с англ. — М.: Издательский дом "Вильямс", 2005. — 1040 с.
5. Росляков А.В. Сети доступа//Учебное пособие для вузов - М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 96 с
6. Сайко В.Г., Казіміренко В.Я., Літвінов Ю.М. Мережі бездротового широкосмугового доступу. – К.: ДУТ, 2015 — 196 с.

Додаткова література

1. Harry G. Perros. Connection-Oriented Networks: SONET/SDH, ATM, MPLS and Optical Networks. - John Wiley & Sons, 2005. – 356 с.
2. Mehmet Toy. Cable Networks, Services, and Management. - John Wiley & Sons, 2015. – 376 с.
3. Specifications Library [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://www.cablelabs.com/specs>
4. О.М. Денисьева, Д.Г. Мирошников. Средства связи для «последней мили». – М.: Эко-Трендз, 2000. – 140 с.

5. Семенов Ю.А. Telecommunication technologies - телекоммуникационные технологии [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://book.itер.ru/preword.htm> – Назва з екрана.
6. Введение в технологию PON [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://ic-line.ru/vvedenie-v-texnologiyu-pon/> – Назва з екрана.
7. Overview of 10Gb/s EPON Status, Requirements and Applications [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://ethernetalliance.org/library/whitepapers/page/4/> – Назва з екрана.
8. Wi-Life [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://wi-life.ru/texnologii> – Назва з екрана.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

10G-EPON	10 Gigabit Ethernet PON
ACL	Access Control List
ADSL	Асиметрична цифрова абонентська лінія
AES	Advanced Encryption Standard
AP	Access point
APON	ATM PON
AR	Доповнена реальність
A-TDMA	Advanced-TDMA
ATIM	Ad-hoc traffic indication map
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWG	American Wire Gauge
BPI	Baseline Privacy Interface specification
BPON	BroadBand PON
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSS	Basic Service Set
BW	Ширина каналу
CAP	Амплітудно-фазова із придушенням несучої модуляція
CATV	Кабельне телебачення
CCA	Channel Clearance Algorithm
CCMP	Counter-Mode CBC MAC Protocol
CM	Cable modem
CMTS	Cable Modem Termination System
CO	Комунікаційний офіс
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CoS	Class of service
CPE	Комунікаційне периферійне обладнання
CRC	Circle Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

CSU	Пристрій обслуговування каналу
CTS	Clear to Send
DA	Destination Address
DBPSK	Differential binary phase shift keying
DCE	апаратура каналу даних
DCF	Distributed Coordination Function
DES	Data Encryption Standard
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DMT	Дискретна мультитоновна модуляція
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specifications
DS	Система розподілу
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DSU	Пристрій обслуговування даних
DTE	Кінцеве обладнання даних
EAP	Extensible Authentication Protocol
EIRP	Equivalent isotropically radiated power
ESS	Extended Service Set
FBT	Fused Biconical Taper
FCS	Frame Check Sequence
FDM	Частотне мультиплексування
FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FTT	Fiber To The
FTTB	Доведення волокна до будівлі
FTTC	Доведення волокна до місця, де розміщено розподільчу коробку
FTTCab	Доведення волокна до розподільчої шафи
FTTH	Доведення волокна до житлового будинку/квартири
GE	Gigabit Ethernet

GEPON	Gigabit Ethernet PON
GFSK	Gaussian Frequency-Shift Keying
GPON	Gigabit PON
HDSL	Високошвидкісна цифрова абонентська лінія
HEC	Контрольна сума заголовку
HFC	Hybrid Fiber Coax -
HT	High Throughput
IAPP	Inter-Access Point Protocol
IBSS	Independent Basic Service Set
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFG	Inter-frame Gap
IP	Internet Protocol
IPS	Intrusion Prevention System
IPTV	IP телебачення
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISI	Inter-Symbol Interference
L/T	Length / Type
LAN	Local Area Network
LDPC	Low-density parity-check code
LLC	Logical Link Control
LLID	Logical Link Identifier
MAC	Media Access Control
MAP	Схема розподілу висхідної смуги частот
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIB	Management Information Base
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MPCP	Multi-point Control Protocol
MPEG	Moving Picture Experts Group
MU-	Multiple User MIMO
MIMO	

OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OLT	Optical Line Terminal
ONU	Optical Networking Unit
OpCode	Optional Code
OSI	Взаємодія відкритих систем
P2MP	Point to multipoint
P2P	Point-to-Point
PAD	Наповнювач
PBCC	Двійкове пакетне згортчне кодування
PCF	Точкова координаційна функція
PDU	Protocol Data Unit
PHY	Фізичний рівень
PLC	Planar Lightwave Circuit
PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
PMD	Physical Media Dependent
PN	Псевдовипадковий код
PON	Passive optical network
POP	Point of Presence - точка присутності
PSK	Preshared Key
QAM	Квадратурна амплітудна модуляція
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RA	Receiver address
RADSL	Адаптивна за швидкістю асиметрична цифрова абонентська лінія
RSA	Rivest, Shamir, Adleman алгоритм
RSN	Robust Security Network
RSSI	Received Signal Strength Indication
rtPS	Real-Time Polling Service

RTS	Request to Send
RTT	Round-trip time
SA	Source Address
SC	Single Carrier
SC/APC	Subscriber (Square / Standard) Connector/AnglePolishedConnector
SC/UPC	Subscriber (Square / Standard) Connector/UltraPolishedConnector
S-CDMA	Synhronous-Code Division Multiple Access
SDSL	Високошвидкісна цифрова абонентська лінія на одну пару
SFD	Стартовий роздільник кадру
SGI	Short Guard Interval
SHDSL	Simmetric High Speed Digital Subscriber Line
SID	Код послуги
SISO	Single-Input Single-Output
SNMP	Simple network management protocol
SOP	Start Of Packet
TA	Transmitter address
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time-Division Multiple Access
TFTP	Trivial File Transfer Protocol
TIM	Traffic indication map
TKIP	Temporal Key Integrity Protocol
TOD	Час доби
ToS	Type of service
TS	Time Stamp
TSF	Timing synchronization function
TSN	Transitional Security Network
UCD	Upstream Channel Descriptor
UDP	User Datagram Protocol
UGS	Unsolicited Grant Service
UGS/AD	Unsolicited Grant Service with Activity Detection

VDSL	Надвисокошвидкісна цифрова абонентська лінія
VoD	Відео на вимогу
VoIP	IP телефонія
VR	Віртуальна реальність
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplexin
WEP	Wireless Equivalent Privacy
WPA	Wi-Fi Protected Access
АІМ	Амплітудноімпульсна модуляція
АКД	апаратура каналу даних
дБм	Децибел на міліват
ПЗ	Програмне забезпечення
СО	Комунікаційний офіс
ФАР	Фазована антенна решітка